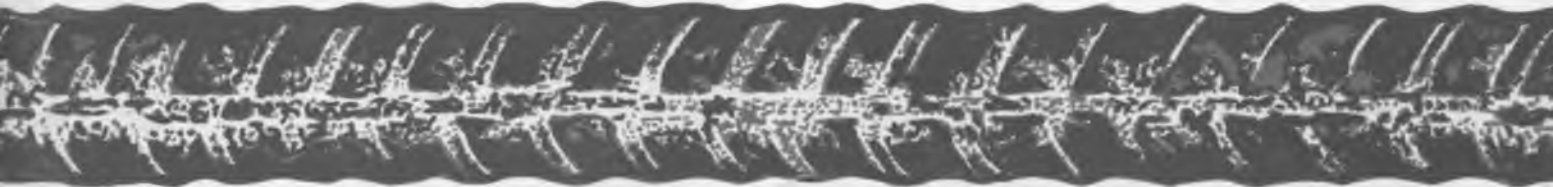
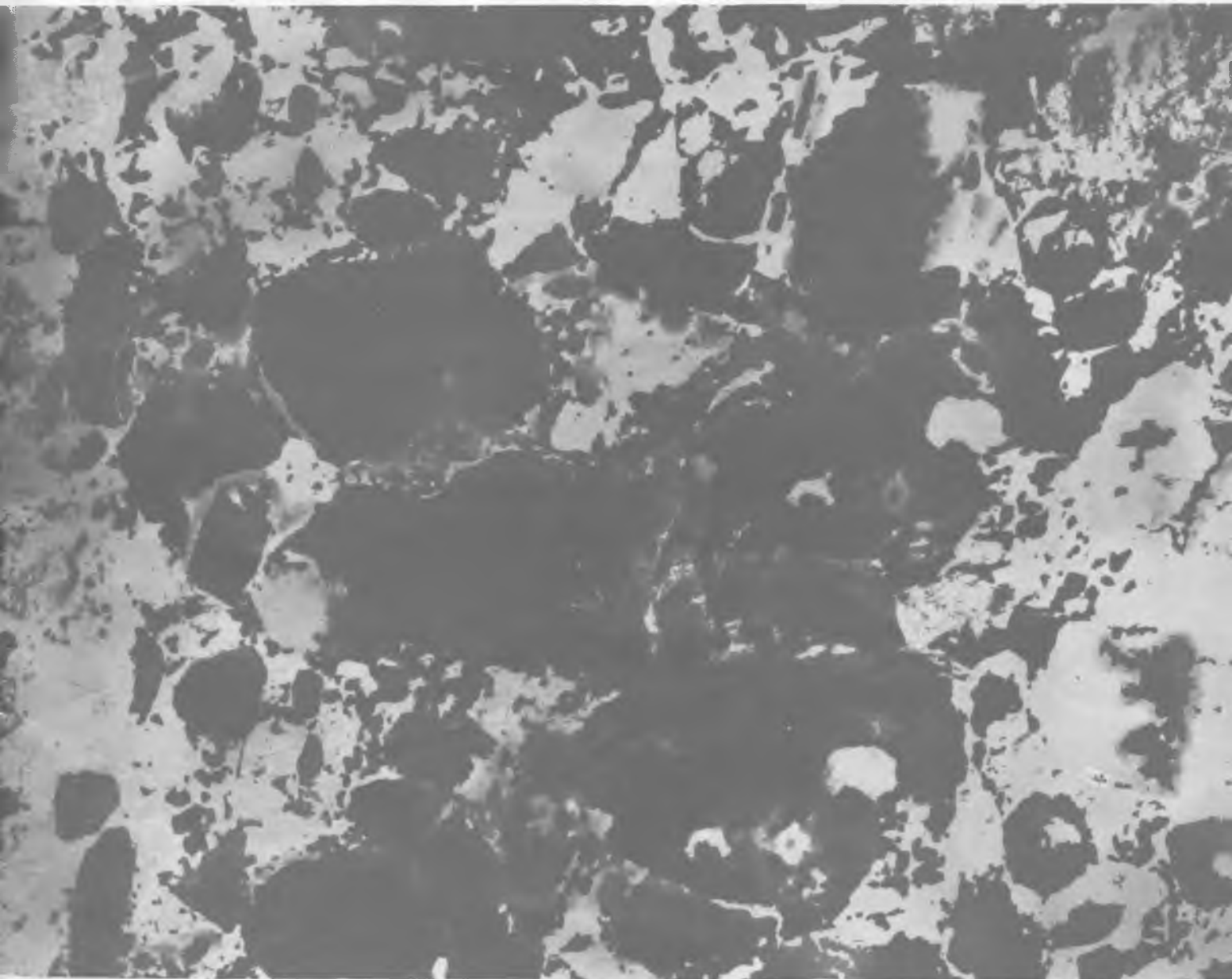


БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

2

2004





НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ИНТЕРПРИБОР

ПРОИЗВОДСТВО И РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ
ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

ОНИКС-2.5 - двухпараметрический измеритель прочности материалов

ОНИКС-О.С - измеритель прочности бетона отрывом со скалыванием, 5...100 МПа

ВИМС-1.У - влагомер универсальный, 3 вида датчиков, 28 материалов

ВИМС-1.Д - влагомер древесины, 0...120 %, 28 пород

ПУЛЬСАР-1.1 - ультразвуковой измеритель прочности материалов и глубины трещин

МТП-1 - толщиномер теплоизоляционных покрытий

10...100 мм, труба \varnothing 20...450 мм

ВИБРАН-1.1 - виброанализатор: 10-10⁶ мм/с, 1...1000 Гц, до 256 линий, 1/3 октавный анализ

ИЧСК-1 - частотный дефектоскоп изделий

ТЕРЕМ-4 - многопараметрический регистратор (деформаций, напряжений, теплового потока, температуры, влажности, вибраций, ...), 8...256 каналов

МИТ-1 - мобильный измеритель теплопроводности, зондовый метод, 0,02...2 Вт/м²К

ИТС-1 - измеритель теплопроводности, стационарный режим



ВИМС-1.3 - влагомер зондовый, 0...100%

ПОИСК-2.Х - измерители защитного слоя бетона, $d = 3...50$ мм, $h = 0...170$ мм

ВИСТ-2.3 - виброметр 5...1000 Гц, 0...3 мм, 0...500 мм/с

ВДЛ-5М - вихретоковый дефектоскоп металлов

ТЕМП-3.Х - термометры и термогигрометры (2-3 канальные, регистрирующие)

РТ-2 - терморегулятор ПИ

- расширенные диапазоны
- интеллектуальная обработка
- автоматическое преобразование параметров
- высокая достоверность
- регистрация результатов и процессов во времени
- интерфейс
- дисплей с подсветкой
- малогабаритность
- легкие и удобные датчики
- аккумуляторное питание

РТМ-5 - система управления термообработки бетона 8 каналов, -50...+200^oС

ТЕРМОТРАНСФЕР - прибор сбора данных регистрации

ТЕРЕМ-3.Х - 8-канальные терморегистраторы

ТЕРМОКОМ-4 - термографический комплекс (минитермографы, средства поддержки)

ТЕРМОСКОП-1 - сервер термографов

Специальные программы компьютерной обработки результатов измерений

454080, Челябинск-80, а/я 12771 т./ф: (3512) 655-638, 608-742
E-mail: info@interpribor.ru <http://www.interpribor.ru>

г.Москва НИИЖБ тел.: 095-174-75-13,
E-mail: carat@niizhb.ru 095-510-94-15
г.Санкт-Петербург тел. 812-318-64-96

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

Издается с апреля 1955 г.

Учредители:
НИИЖБ, ВНИИжелезобетон

СОДЕРЖАНИЕ

БЕТОНЫ

- ФАЛИКМАН В.Р., СОРОКИН Ю.В., БАШЛЫКОВ Н.Ф., СМИРНОВ В.А.*
Бетоны на каустическом доломите для полов
промышленных зданий 2
- ДВОРКИН Л.И., ДВОРКИН О.Л., ЖИТКОВСКИЙ В.В.*
Расчет оптимального содержания песка в бетоне 4
- ЧЕРНЯВСКИЙ В.Л.* Особенности адаптации бетона в сложных
эксплуатационных условиях 6
- ШУШПАНОВ В.А., ОРЛОВСКИЙ В.М., ПОГОРЕЛЯК О.А.,
ЧУДНОВСКИЙ С.М.* Расчет оптимальных дозировок пластификаторов
бетонных смесей с учетом минералогического и вещественного
состава цемента 10

В ПОМОЩЬ ПРОЕКТИРОВЩИКУ

- БАБИЧ В.И., КОЧКАРЕВ Д.В.* Расчет элементов железобетонных
конструкций деформационным методом 12
- АВETИСЯН Р.С., ДАДАЯН Т.Л., ВАРДАНЯН А.А.* Влияние
трещинообразования на периоды собственных колебаний
железобетонных стоек 17

ТЕОРИЯ

- БАКУШЕВ С.В.* Геометрически нелинейный вариант
деформационной теории пластичности бетона 19

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

- ПОДВАЛЬНЫЙ А.М.* О классификации видов коррозии бетона 23

СТАНДАРТЫ И НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

- ВОЛКОВ Ю.С.* Евростандарт на бетон введен в действие 28

ИНФОРМАЦИЯ

- ТРАМБОВЕЦКИЙ В.П.* Бетон и биопозитивное строительство 30

НАМ ПИШУТ

- МИХАЙЛОВ К.В.* Важность единой терминологии в области бетона
и железобетона 31

В.Р.ФАЛИКМАН, чл.-корр. РИА, Ю.В.СОРОКИН, канд. техн. наук (НИИЖБ); Н.Ф.БАШЛЫКОВ, канд. техн. наук, В.А.СМИРНОВ, инж. (ЗАО «Полигод»)

Бетоны на каустическом доломите для полов промышленных зданий

Многообразие условий эксплуатации полов промышленных зданий определяет широкий диапазон свойств и предъявляемых к ним требований, в том числе, не в последнюю очередь, санитарно-гигиенического и экологического характера.

Основными показателями, определяющими качество материалов для полов, являются механическая прочность, стойкость к истирающим, химическим и влажностным воздействиям, стабильность состава и свойств, отсутствие выделения вредных веществ и пыли в процессе их эксплуатации и, наконец, технологичность материала, что предполагает минимизацию материальных и трудовых затрат, связанных с приготовлением бетона, устройством и эксплуатацией покрытия.

Соблюдение перечисленных требований в значительной степени обеспечивает применение магнезиального цемента [1]. Бетон на его основе отличается высокими прочностными характеристиками, химической стойкостью и износостойкостью, что позволяет использовать его для устройства полов промзданий, в том числе с тяжелыми условиями эксплуатации (предприятия химической промышленности, тяжелого машиностроения, энергетического комплекса и т. п.).

Существует целый ряд промышленных методов производства MgO, однако в строительстве реальное применение имеет главным образом продукт обжига магнезита - *каустический магнезит* [2]. Однако мировые запасы магнезита относительно невелики и строительная индустрия не может рассчитывать на полное удовлетворение своей потребности в каустическом магнезите, так как основная часть продукта обжи-

га MgCO₃ направляется на производство огнеупоров.

Следует отметить, что уже несколько десятилетий, как найдена достойная альтернатива для магнезита. Речь идет о доломитах, дешевых и весьма распространенных минералах [1, 3, 4], представляющих собой двойной карбонат магния и кальция (MgCO₃·CaCO₃), содержащий теоретически 30,4% CaO, 21,9% MgO и 47,7% CO₂. Каустический доломит представляет собой продукт тонкого помола обожженного природного доломита при температуре диссоциации MgCO₃ (около 650-720°C). Полуобожженный доломит содержит в своем составе 20-28% активного оксида магния и инертное вещество, представленное в основном CaCO₃ в количестве 60-70%. Для приготовления бетона на полуобожженный доломит, как и каустический магнезит, затворяют растворами некоторых солей-электролитов типа MgCl₂·6H₂O, MgSO₄·7H₂O, FeSO₄·5H₂O и т. д. [1].

С точки зрения теории микробетона профессора Юнга, магнезиально-доломитовый цемент можно рассматривать как естественную композицию магнезиального цемента с карбонатным наполнителем [4]. Другими словами, продукт селективной диссоциации доломита является дисперсной системой, в которой активный оксид магния, обладающий высоким энергетическим потенциалом, равномерно распределен в среде микронаполнителя CaCO₃.

Комплекс экспериментальных исследований, выполненных ГУП «НИИЖБ» и ЗАО «Полигод», показал, что предназначенный для производства высокопрочных бетонов каустический доломит должен соответствовать следующим требованиям:

содержание MgO - не менее 19,0% массы доломита;

интервал температуры термического разложения MgCO₃ в доломите (начало-конец разложения) должен составлять 40-60°C;

преобладающая крупность кристаллов (зерен), по данным петрографического анализа, - 80-120 мкм [5].

Анализ результатов определения прочности бетонов, полученных на основе каустического доломита, измельченного по различным режимам, показывает, что для этого вяжущего увеличение дисперсности является эффективным средством повышения прочности бетона. В частности, увеличение удельной поверхности каустического доломита с 1320 до 5500 см²/г обеспечивает существенный рост прочности бетона (более чем в 2 раза) во все сроки твердения. Дальнейшее увеличение тонкости помола в пределах до 8500 см²/г технически нецелесообразно, так как повышает прочностные характеристики всего на 10-20%.

Обеспечивая высокие прочностные характеристики бетонов (до 60-80 МПа и более), применение каустического доломита в то же время связано с такими технологическими и техническими недостатками, как ускоренное структурообразование и схватывание бетонных смесей, значительные собственные деформации расширения, превышающие границы уровня безопасности, а также низкую водостойкость бетона.

С целью регулирования структурно-технических свойств вяжущего на основе каустического доломита было изучено влияние различных химических добавок на сохранность бетонных смесей на его основе, а также на физико-ме-

ханические свойства и долговечность бетонов (темпы твердения, прочность, собственные деформации, водостойкость, морозостойкость и водонепроницаемость, стойкость в агрессивных средах). В качестве модификаторов были использованы алюмофосфатная, фосфатная, боратная добавки и их сочетания. Добавки вводили на стадии помола полубожеженного доломита.

Установлено, что при использовании комплексных фосфатно-боратных добавок существенно нормализуются процессы структурообразования и твердения бетонов на основе каустического доломита и улучшаются их свойства: достигается устойчивый рост прочности, снижаются собственные деформации расширения, уменьшается опасность развития деструктивных процессов (образование трещин) и т.д. Так, например, введение указанных добавок в количестве 1-3,2% массы каустического доломита в магнезиально-доломитовые бетонные смеси значительно повышает их сохраняемость. Механизм действия этих добавок как замедлителей схватывания связан, по-видимому, с осаждением и формированием фосфатно-боратных комплексов. Мелкие частицы труднорастворимых добавок адсорбируются при помоле на частицах активного оксида магния, затрудняя доступ к ним затворителя. Затем в растворе образуются хелатные комплексы, влияющие на прочность и структуру цементного камня. Кроме того, образуя указанные комплексы, фосфатно-боратные добавки обеспечивают наибольшее повышение водостойкости бетона на каустическом доломите: значение коэффициента размягчения возрастает с 0,43 до 0,92-1,03 для бетонов из умеренно подвижных смесей и до 0,85-0,93 для бетонов из высокоподвижных смесей. Установлено, что химические добавки на основе фосфатных и боратных соединений способствуют также существенному повышению морозостойкости и водонепроницаемости, значения которых обеспечиваются на уровне F100 и W10, соответственно. Отметим, что прочность модифицированных бетонов с добавками в возрасте 7-28 сут соответствует прочности контрольного бетона или превышает его. Под-

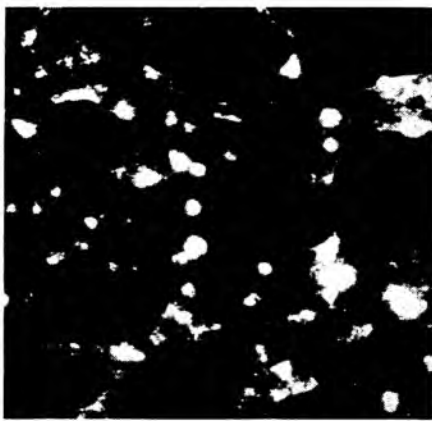


Рис. 1. Пористость бетона на доломитовом вяжущем без добавок

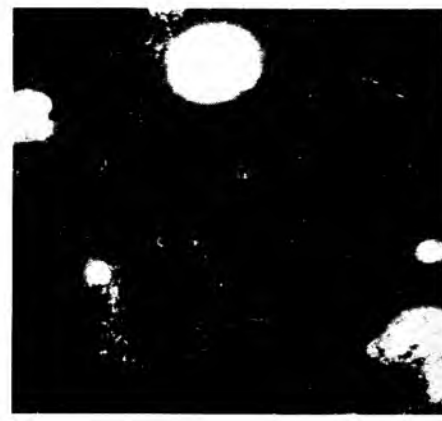


Рис. 2. Пористость бетона на доломитовом вяжущем с добавками фосфатных и боратных соединений

тверждена также высокая стойкость бетона на каустическом доломите в таких агрессивных средах, как бензин, дизельное топливо, спирты, минеральные масла и пр.

Кроме того, анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что смешанная добавка фосфат + борат снижает уровень деформаций расширения бетона на каустическом доломите в возрасте 28 сут практически в 10 раз [5].

Для выявления механизма улучшения показателей качества бетонов на каустическом доломите при введении добавок фосфатно-боратных соединений были проведены исследования поровой структуры методами оптической микроскопии с соответствующей компьютерной обработкой.

Представленные на рисунках 1 и 2 микрофотографии поровой структуры бетонов и анализ ее параметров (см. таблицу), показывают, что бетон с добавками, по сравнению с бездобавочным бетоном, имеет уменьшенную (на 15%) общую пористость при пониженном среднем диаметре пор (на 39%) и значительно большем относительном содержании пор размером до 0,3 мм, а также значительно увеличенную среднюю толщину междупоровых перегородок (в 1,87 раза). Такая структура обеспечивает повышение прочностных характеристик бетона, а в сочетании с образованием нерастворимых фосфатно-боратных комплексов и повышением плотности - увеличение его водонепрони-

цаемости, морозостойкости и стойкости в агрессивных средах.

Проведенными исследованиями установлена возможность изготовления на основе каустического доломита ячеистых бетонов с широким диапазоном плотностей и прочностных характеристик.

Испытания показали, что при плотности 350-1400 кг/м³ и прочности 0,9-20,5 МПа соответственно коэффициент теплопроводности пенобетонов на каустическом доломите составляет 0,09-0,51 Вт/м²С, что соответствует уровню теплопроводности традиционных пенобетонов с соответствующей плотностью.

Звукоизолирующая способность магнезиально-доломитового пенобетона плотностью 540-900 кг/м³ составляет 41-45 дБ/м², коэффициент звукопоглощения в диапазоне частот от 100 до 2000 Гц составляет 0,057-0,83 соответственно, что позволяет отнести пенобетон на каустическом доломите к эффективным звукоизоляционным материалам.

Выявлена техническая возможность применения в качестве заполнителей для бетонов на основе каустического доломита промышленных отходов (древесная стружка, золошлаковые смеси, бумажные и пластиковые отходы, отходы переработки автомобильных шин и т.д.) при частичном или полном замещении ими природного заполнителя строительного песка. Предварительной обработки органических заполнителей не требуется. При этом

№ п/п	Показатели	Бетон на вяжущем без добавок	Бетон на вяжущем с добавками фосфатных и боратных соединений
1	Пористость, %	12,73	10,84
2	Содержание пор в единице объема, 1/см ³	1199,5	1327,5
3	Средняя толщина междупоровых перегородок, мм	0,15	0,28
4	Число пор в плоскости шлифа	699	982
5	Общий периметр пор, мм	114,9	72,8
6	Общая площадь пор, мм ²	2,41	3,43
7	Средняя площадь пор, мм ²	0,003	0,003
8	Средний периметр пор, мм	0,16	0,07
9	Средний диаметр пор, мм	0,041	0,025
10	Средний фактор формы	0,67	0,57
11	Максимальный диаметр пор, мм	0,35	0,83
12	Минимальный диаметр пор, мм	0,01	0,01
13	Количество пор размером до 0,3 мм	696	975
14	Общая площадь пор размером до 0,3 мм, мм ²	2,14	0,95
15	Количество пор размером более 0,3 мм	3	7
16	Общая площадь пор размером более 0,3 мм, мм ²	0,28	2,48

обеспечивается получение бетонов плотностью 1400-2200 кг/м³ с прочностью 8-32 МПа.

Сочетание бетонов с различной плотностью на каустическом доломите позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики полов промышленных зданий. Пенобетоны и легкие бетоны с использованием промышленных отходов могут быть использованы для устройства нижнего слоя двухслойных полов для обеспечения и повы-

шения их тепло- и звукоизоляции. Верхний слой, защищающий весь пол от воздействия воды, агрессивных сред, физического и температурного факторов, изготавливается из тяжелого бетона на модифицированном доломитовом вяжущем.

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод о возможности использования бетонов на магнезиально-доломитовом вяжущем для устройства полов промзданий. Эффективность таких

полов может быть повышена за счет введения добавок фосфатных и боратных соединений и применения бетонов с разной плотностью, в том числе пенобетонов и легких бетонов с заполнителями на основе техногенных продуктов.

Авторы выражают глубокую признательность д-ру хим. наук, А.Я.Вайнеру, канд. техн. наук Т.А.Уховой, инж. И.В.Звереву, Л.Г.Бернштейну за помощь в постановке и проведении экспериментальных работ и обсуждении результатов.

Библиографический список

1. Вездь Е. И., Бакланов Г. М., Жаров Е. Ф., Блудов Б. Ф. и др. //Химия в производстве строительных материалов. Киев: изд-во Будівельник. 1968. 194 с.
2. Пуха И. К. //Технология переработки природных солей и рассолов. Под ред. В. В. Вязовой и О. Д. Кашкарева. Ленинград: изд-во Химия. 1964. С 114-149.
3. Kacker K. P., Mehzoza G. S., Rai M. // J. Appl. Chem. 1970 V.20 No 6. P. 189-193.
4. Бутт Ю. М., Богомолов Б. Н., Дворкин Л. И. //Вяжущие материалы Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: изд-во Наука. 1970. С. 179.
5. Смирнов В. А., Вайнер А. Я., Башлыков Н. Ф., Фаликман В. Р., Бернштейн Л. Г. //Высококачественный магнезиальный бетон на каустическом доломите. Бетон на рубеже третьего тысячелетия: материалы 1-й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона, 9-14 сентября 2001 г., Москва: В 3 кн. – М.: Ассоциация «Железобетон», 2001 – Кн. 2. С. 1049-1057.

Л.И.ДВОРКИН, д-р техн. наук, О.Л.ДВОРКИН, канд. техн. наук, В.В.ЖИТКОВСКИЙ, инж. (Украинский государственный ун-т водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

Расчет оптимального содержания песка в бетоне

Одной из основных задач оптимизации составов бетона является определение соотношения заполнителей, обеспечивающего минимальный расход цемента. В бетоне с заданными показателями прочности и удобоукладываемости выбор соотношения мелкого и крупного заполнителей основан на правиле оптимального содержания песка, в соответствии с которым при заданном расходе цементного теста бетонная смесь имеет наилучшую удобоукладываемость или соответственно наименьшую водопотребность только при опреде-

ленном расходе песка [1,2]. В практике проектирования составов бетонов применяются обычно эмпирические рекомендации по установлению доли песка в смеси заполнителей γ или однозначно связанного с ней коэффициента α раздвижки зерен крупного заполнителя цементно-песчаным раствором [2].

Одна из первых попыток получить расчетную зависимость для определения зернового состава заполнителей с учетом удобоукладываемости бетонных смесей сделана М.Боломеем [3]. В отличие от других из-

вестных формул, предложенных для определения зернового состава сухих смесей наибольшей плотности, характеризующих т.н. "идеальные" кривые просеивания, формула М.Боломая с помощью специального коэффициента разделяет бетонные смеси на два вида – жесткие и пластичные. Позднее М.З.Симоновым предложены [4] формулы для расчета зернового состава заполнителей бетонных смесей с более узкой градацией по удобоукладываемости. Однако эмпирические зависимости данного типа являются чрезмерно обобщенными, не учитывают расход цементного теста и особенности конкретных материалов.

Попытки аналитического решения задачи расчета оптимального содержания песка в бетонных смесях изложены в работах [1, 5-7].

В данной статье развивается это направление, предлагается и анализируется формула оптимального содержания песка r_{opt} с учетом содержания цементного теста ($V_{ц,т}$), пустотности ($P_{a,з}$) и удельной поверхности заполнителей (U_3).

Правило оптимального содержания песка можно рассматривать как следствие правила постоянства водопотребности бетонных смесей [1,2]. Модифицировав экспоненциальное выражение, предложенное Т.Пауерсом [8], уравнение вязкости бетонной смеси можно записать таким образом:

$$\eta_{б.с.} = K_0 \exp \left(\frac{b(K_1 - 1)}{K_1 + \delta K_2} \exp \frac{a(V_{ц}/V_в)}{1 + V_{ц}/V_в} \right), \quad (1)$$

где K_0 , a , b — эмпирические коэффициенты ($K_0 = 20$, $a = 19$, $b = 5,3 \cdot 10^{-4}$ (вязкость определялась методом всплывающего шарика)), $V_{ц}$ — объем цемента; $V_в$ — объем воды; $K_1 = (P_{a,з} + 1)/P_{a,з}$ — коэффициент, учитывающий пустотность заполнителей по отношению к их абсолютному объему ($P_{a,з}$); $K_2 = U_3/P_{a,з}$ — коэффициент, комплексно учитывающий пустотность и удельную поверхность заполнителей; δ — условная средняя толщина слоя цементного теста на зернах заполнителя.

Как следует из выражения (1), вязкость и, следовательно, удобоукладываемость бетонных смесей на неизменных исходных материалах определяется в общем случае цементно-водным отношением цементного теста ($V_{ц}/V_в$) и толщиной его слоя (δ).

Оптимальное содержание песка в смеси заполнителей в общем случае находится из условия

$$r \rightarrow r_{opt} \text{ при } V_{ц,т} = \text{const, если } h_{см} \rightarrow \text{min.} \quad (2)$$

Расчет δ возможен при известных значениях пустотности и удельной поверхности смеси мелкого и крупного заполнителей

$$\delta = \frac{V_{ц,м} - P_{a,з}(1 - V_{ц,м})}{U_3 V_3}. \quad (3)$$

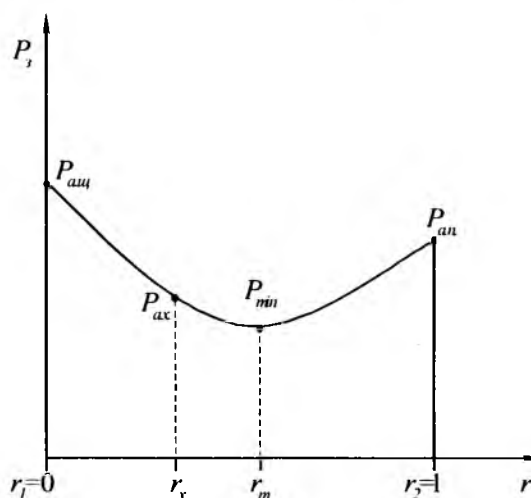
Удельная поверхность смеси заполнителей монотонно возрастает по мере увеличения содержания в ней песка и может быть рассчитана при известных значениях удельной поверхности мелкого (U_n) и крупного ($U_{щ}$) заполнителей

$$U_3 V_3 = U_n r + U_{щ}(1 - r) = U_{щ} + (U_n - U_{щ})r. \quad (4)$$

Точный теоретический расчет пустотности заполнителей как функции их объемного соотношения выполнить практически невозможно, поскольку интегральная величина $P_{a,з}$ смеси заполнителей зависит от их расположения в пространстве, которое, в свою очередь, определяется формой, особенностями поверхности зерен и пр. Ориентировочный расчет пустотности сухой смеси мелкого и крупного заполнителей возможен, если задаться параболическим видом аппроксимирующей кривой (рис. 1) и записать уравнения трех ее точек

$$\begin{cases} P_{a,щ} = ar_1^2 + br_1 + c \\ P_{a,п} = ar_2^2 + br_2 + c \\ P_{a,x} = ar_x^2 + br_x + c \end{cases}, \quad (5)$$

где $P_{a,щ}$, $P_{a,п}$ — значения пустотности соответственно крупного и мелкого заполнителей в уплотненном (с помощью, например, вибрирования) состоянии; r_1 и r_2 — крайние значения r на кривой (см. рисунок); $P_{a,x}$ — экспериментальное значение пустотности смеси заполнителей в уплотненном состоянии при некотором промежуточном значении r_x .



Зависимость пустотности смеси сухих заполнителей от доли песка в смеси песка и щебня

Решением системы (5) находим значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} a &= \frac{P_{a,щ}r_x - P_{a,щ} + P_{a,x} - P_{a,п}r_x}{r_x^2 - r_x}; \\ b &= \frac{P_{a,щ} - P_{a,щ}r_x^2 - P_{a,п}r_x^2 + P_{a,x}}{r_x^2 - r_x}; \\ c &= P_{a,щ}. \end{aligned} \quad (6)$$

Экспериментальные значения пустотности крупного и мелкого заполнителей и их смеси легко определить, зная значения их истинной (ρ) и насыпной (ρ_n) плотностей ($P_a = \rho/\rho_n - 1$).

Пустотность смеси сухих заполнителей бетона можно рассчитать с помощью квадратного уравнения

$$P_{a.з.} = ar^2 + br + P_{a.щ} \quad (7)$$

Переход от пустотности по отношению к абсолютному объему (P_a) к пустотности по отношению к общему объему, включающему пустоты, (P) находится по формуле

$$P_a = P/(1-P) \quad (8)$$

Уравнение (3) для расчета δ с учетом выражений (4) и (7), а также потерь цементного теста на заполнение пор заполнителя K_n и объема вовлеченного воздуха $V_{вз}$ можно представить в виде

$$\delta = \frac{K_n V_{ц.м} - (ar^2 + br + P_{a.щ}) (1 - K_n V_{ц.м} - V_{вз})}{U_{щ} + (U_n - U_{щ})r} \quad (9)$$

Из условия $\partial\delta/\partial r = 0$ можно найти формулу доли песка в смеси заполнителей Γ_0^δ , обеспечивающей максимальные значения толщины обмазки δ при $V_{ц.т} = \text{const}$

$$\Gamma_0^\delta = \frac{\sqrt{(U_{щ}a)^2 + Ba \left(BP_{щ} - bU_{щ} - \frac{K_n V_{ц.м} B}{A} \right)}}{Ba} - \frac{U_{щ}}{B} \quad (10)$$

где $A=1-K_n V_{ц.т}-V_{вз}$, $B=U_n-U_{щ}$

Постоянство водопотребности в пределах определенной области Ц/В при заданной удобоукладываемости может быть достигнуто лишь при соответствующем корректировании Γ .

Таким образом, расчет оптимального значения Γ должен производиться по формуле

$$\Gamma_0 = K_{Ц/В} r_0^\delta \quad (11)$$

где $K_{Ц/В}$ - коэффициент, учитывающий изменение вязкости бетонной смеси при изменении Ц/В и $\delta = \text{const}$.

Как показали опыты, этот коэффициент можно аппроксимировать линейной функцией

$$K_{Ц/В} = K_3 e^{K_4 \frac{Ц}{В}} \quad (12)$$

При использовании в качестве заполнителей кварцевого песка и гранитного щебня $K_3 = 0,68 \dots 0,75$; $K_4 = 0,12 \dots 0,15$.

Расчетные значения Γ_0 близки к известным эмпирическим значениям. В отличие от последних они позволяют прогнозировать влияние многих факторов, сказывающихся на величине Γ_0 при изменении пустотности и удельной поверхности заполнителей при различных значениях объема цементного теста и Ц/В.

Библиографический список

1. Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов. М.: Стройиздат, 1975.
2. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1980.
3. Болоней М. Грануляция и предвидение вероятной прочности бетонов. "Траваux", №30, 1935.
4. Симонов М.З. Основы технологии легких бетонов. М.: Стройиздат, 1973.
5. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981.
6. Шмигальский В.Н. Оптимизация составов цементобетонов. Кишинев: "Штинца", 1981.
7. Штаерман Ю.Я., Тевзадзе Д.Н. Плотный бетон на многофракционном заполнителе. Тбилиси: "Сабчота Сакартвело", 1967.
8. Powers T.C. "Cement Lime and Gravel", 1966, v. 41, №2, 3.

В.Л.ЧЕРНЯВСКИЙ, д-р техн. наук, проф. (Харьковский государственный технический ун-т строительства и архитектуры)

Особенности адаптации бетона в сложных эксплуатационных условиях

Склонность бетона к коррозионному разрушению постоянно подавляла возможность обнаружить его адаптационные свойства, непосредственно связанные с гидратацией реликтов вяжущего, что происходит в сформировавшейся структуре бетона строительных конструкций. Как было показано нами ранее [1], цементный бетон относится к классу ограниченно структурно изменяю-

щихся систем. Практически полезной иллюстрацией процессов формирования, сохранения и исчерпания этим популярным материалом своих адаптационных свойств является его поведение как главного компонента строительных конструкций зданий и сооружений объектов черной металлургии [2], для которых характерны сложные нестационарные, как правило, слабо контроли-

руемые эксплуатационные воздействия, включающие нагрев и увлажнение сульфат-, карбонат- (бикарбонат-) и хлорсодержащими водными растворами природного или технического происхождения. Источниками нагрева является конвективное или лучистое тепло, выделяемое металлургическими печами, конвертерами, спекательными машинами, горячим коксом, агломератом, чугу-

ном, сталью, прокатом, шлаком. Основными причинами увлажнения конструкций в помещениях с повышенными тепловыделениями являются мокрая уборка пыли, а также грунтовые и иные подземные воды, действующие на заглубленную часть фундаментов под тепловые агрегаты, технические или оборотные воды, используемые для охлаждения шлака, металла в установках грануляции, разливочных машин, станов горячей прокатки и т.п.

При обследовании значительно числа зданий и сооружений рудоподготовительного, коксохимического и металлургического производств России и Украины [2, 3] были отобраны и исследованы образцы бетона примерно из двух тысяч конструкций, срок службы которых в конкретной эксплуатационной среде составлял от 2 до 35 лет, и обеспечивался в основном за счет первичной защиты без каких-либо дополнительных противокоррозионных покрытий, которые при строительстве не были выполнены, часто в нарушение требований нормативных документов, действующих на время проектирования и строительства.

Известны два, существенно отличающихся подхода к оценке вида и степени агрессивности эксплуатационной среды по отношению к бетону строительных конструкций. Первый, кажущийся вполне естественным, основан на непосредственном проведении замеров ее параметров. Однако, в этом случае заинтересованные лица сразу сталкиваются с серьезными проблемами при назначении источников формирования выборки, соблюдении требований к ее представительности и иными методическими затруднениями, связанными с сезонными или технологическими колебаниями наблюдаемых параметров внешней среды. Опыт обследования производственных зданий и сооружений свидетельствует о том, что систематический контроль за средой регулярно не производится, а непредвиденные причины изменения агрессивных воздействий, связанные

с несоблюдением проектного технологического режима и нарушением предписанных правил эксплуатации оборудования и инженерных сетей на предприятии, фиксируются далеко не всегда. С учетом сказанного, нами [3] был предложен другой, принципиально отличающийся от предыдущего, подход, который заключается в отборе образцов бетона из защитного слоя конструкций на конкретном участке строительного объекта с последующим исследованием особенностей его коррозионного состояния, в том числе бетона, исчерпавшего свои свойства в качестве первичной защиты железобетонного элемента. При этом бетон следует рассматривать в качестве своеобразного «индикатора» вида и степени агрессивности эксплуатационной среды. В подобных случаях все многообразие внешних воздействий (с учетом вида напряженного состояния бетона в конструкции) может быть сведено к нескольким существенным признакам коррозионного процесса, которые являются инструментально наблюдаемыми. Известный в технической диагностике метод распознавания образов является достаточно корректным способом формализации процесса принятия решения при группировке объектов по нескольким признакам и состоит из трех этапов: выбора признаков, существенно характеризующих объект и формирующих в дальнейшем «обобщенный образ» его технического, например, коррозионного состояния; определения количества групп, на которые должна делиться исходная совокупность объектов; разработки правила для принятия решения о принадлежности объекта к конкретной группе. При этом первичная группировка является «обучающей» для новых образцов с тем же перечнем характеристик, формирующих «обобщенный образ» коррозионного состояния бетона*.

* В экспериментальных исследованиях принимали участие к.т.н. Дубницкий В.Ю. и д.т.н. Ольгинский А.Г.

В качестве признаков, существенно характеризующих коррозионные процессы в цементном бетоне, который, по мнению В.М.Москвина, в реальных условиях далеко не всегда разрушается строго по одному из трех описанных им механизмов [4], нами выбраны те признаки, которые имеют достаточно надежное инструментальное обеспечение. Это, прежде всего, относительное содержание цементных реликтов и т.н. «дефектных участков» (поры, капилляры, трещины и иные пустоты) в вяжущей составляющей бетона, а также степень заполнения пустот в бетоне продуктами коррозии. Все указанные признаки определяются планиметрическим методом оптико-микроскопического анализа. Кроме того, в перечень признаков, формирующих «обобщенный образ», входят оценки содержания главных клинкерных минералов, гидроксида кальция, гидросульфатоалюминатов кальция, двуводного гипса и карбонатов кальция в виде кальцита, ватерита и арагонита. Для их идентификации, в основном, использован количественный метод фазового рентгеновского анализа, результаты которого оформлены в виде «вербальных признаков». Несмотря на разнообразие внешних, как правило, периодических воздействий, существенно связанных с параметрами технологических процессов и природных условий, характер коррозионных изменений подавляющего большинства исследованных образцов, вошедших в каждую из описанных далее групп, оказался весьма похожим. При этом обнаружено, что наличие химически активных сред в сочетании с термическими воздействиями стимулирует протекание в бетоне сложных процессов, основными из которых являются поздняя гидратация цементных реликтов, сульфатизация, карбонизация и вымывание составляющих цементного камня, что происходит на фоне общей реакции структуры бетона на массообменные процессы. Роль последних, носящих в основном физико-химический характер, с по-

вышением температуры становится преобладающей.

Группу I образовали образцы бетона, для которых относительное количество цементных реликтов (x_1) составило около 20%, степень заполнения пустот (x_2) - около 80%, гидроксид кальция (x_3) практически отсутствовал, гидросульфоалюминаты кальция (x_4) находились в незначительном количестве, а двухводный гипс (x_5) и карбонаты кальция (x_6) - в значительном количестве. Для образцов, попавших в группу II, характерна следующая ситуация: $x_1 \sim 20\%$, $x_2 \sim 50\%$, x_3 и x_4 - незначительное количество, x_5 и x_6 - значительное количество. Для образцов, сформировавших группу III, оказалось соответственно: $x_1 \sim 30\%$, $x_2 \sim 20\%$; x_3 и x_6 - значительное количество, x_4 - практически отсутствует, а x_5 находится в незначительном количестве. Проведенная группировка строительных объектов по коррозионному состоянию бетона в защитном слое конструкций представляется полезной и позволяет избежать индивидуальной схемы выбора мероприятий по обеспечению долговечности железобетонных конструкций основных цехов предприятий черной металлургии (и близких к ним по описанной группе свойств объектов) при их возведении и ремонте [3].

В процессе исследования образцов бетона, отобранных из конструкций объектов, сформировавших указанные группы, с помощью фазового рентгеновского анализа удалось получить сведения об относительном содержании силикатных фаз цементного клинкера по суммарному эффекту $d_{\alpha} = 2,73(2,78)\text{Å}$ и гидроксида кальция по индивидуальному эффекту $d_{\alpha} = 4,90(4,92)\text{Å}$. Видно (рис. 1), что на стадии потери бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре в его цементном камне присутствует некоторое количество силикатных реликтов вяжущего, однако кристаллический гидроксид кальция практически не наблюдается. Кроме того, при довольно высокой интенсивности разрушения бе-

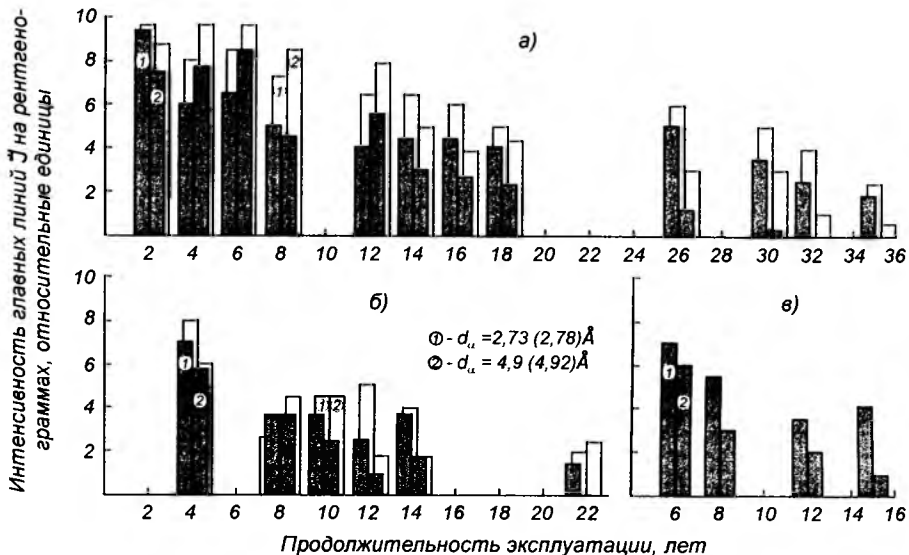


Рис. 1. Относительное содержание силикатных фаз клинкера (1) и гидроксида кальция (2) в цементном камне конструкций групп I (а), II (б), III (в) при интенсивном (■) и ограниченном (□) действии среды

тона конструкций, отнесенных к группе III, количество силикатных реликтов вяжущего в цементном камне примерно в полтора раза больше, чем в образцах бетона, отобранных из объектов, принадлежащих к группам I и II и находящимися в той же стадии исчерпания бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Описанные результаты подтверждают высказанные нами ранее [5] положение о том, что свойство адаптивности может реализоваться только при соблюдении двух обязательных условий: во-первых, наличия ресурса адаптации, главным образом, в виде клинкерных реликтов вяжущего и, во-вторых, осуществимости механизма использования этого ресурса, т.е. протекания собственно адаптационного процесса. При этом заметим, что даже в полностью разрушенном бетоне присутствует примерно 10...15% от первоначального количества цементных реликтов, т.е. первое обязательное условие адаптивности соблюдается практически всегда. Для обследованных конструкций такое состояние оказывается характерным приблизительно через тридцать (группа I), двад-

цать (группа II) и пятнадцать (группа III) лет эксплуатации (см. рис. 1). Однако за указанное время коррозионную активность стальной арматуры можно признать однозначной. Таким образом, при соблюдении первого условия адаптивности, второе обязательное условие не всегда соблюдается, т.е. бетон за указанное время практически исчерпал свои адаптационные возможности и, естественно, перестал функционировать как защитный слой железобетонных конструкций.

Определенного внимания заслуживают результаты экспериментальных исследований процесса заполнения продуктами вторичного минералообразования капиллярно-порového пространства бетона, что поименовано нами как процесс «естественной кольматации» [3]. Для бетона конструкций, отнесенных к трем перечисленным выше группам, характерна различная степень проявления кольматирующего эффекта, связанная со степенью заполнения пор, трещин и капилляров цементного камня в бетоне. Рис.2 суммирует результаты статистической обработки данных петрографического анализа естественной кольматации

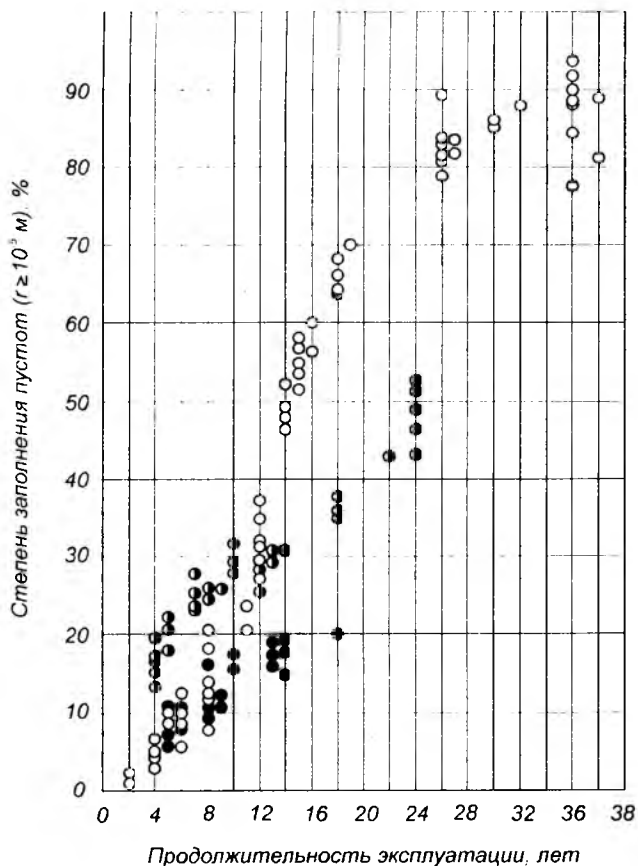


Рис. 2. Результаты определения степени естественной кольматации пор бетона конструкций групп I (○), II (○●), III (●)

цементного камня в бетоне, характерной для эксплуатационных сред различных технологических участков предприятий черной металлургии. Заметим при этом, что нацело заполненные поры встречаются крайне редко. Описанные результаты находятся в удовлетворительном согласии с данными, представленными на рис. 1. Процесс естественной кольматации может рассматриваться как главная причина, объясняющая самопроизвольную консервацию бетона в эксплуатационной обстановке. Продолжительность периода сохранения или временно-го улучшения бетоном защитных свойств, сформировавшихся в результате естественной кольматации, определяется видом и степенью агрессивности среды, первоначальной проницаемостью и толщиной закольматированного слоя бетона. При обследовании конструкций зда-

ний и сооружений предприятий черной металлургии, возведенных 8...13 лет назад, мы наблюдали бетон, характеризующийся величиной капиллярного водопоглощения около 2% и менее, что свидетельствует о значительном, по сравнению с первоначальным (4...6%), снижении его проницаемости за счет взаимодействия со средой слабой и средней степени агрессивности. Что касается кольматации бетона под действием сильно агрессивной среды аналогичного вида, то продолжительность периода консервации бетона оказывается весьма незначительной и не может быть предметом практического интереса.

Таким образом, взаимодействие цементного камня бетона с агрессивной средой, как правило, включает не только разрушительные (коррозионные), но и созидательные (адаптационные) процессы [5], и в

зависимости от их соотношения может быть условно разделено на два временных интервала. В первом из них преобладает созидательная составляющая, что приводит к сохранению или даже улучшению функциональных свойств бетона (прочности, непроницаемости). Во втором преимущественной становится разрушительной составляющей становится очевидным и это сопровождается снижением прочности и повышением проницаемости бетона. Соотношение продолжительности каждого из этих временных интервалов в обеспечении срока службы строительных объектов различного назначения зависит при прочих равных условиях от вида и степени агрессивности среды [5], что подтверждается историей исследований проблем долговечности бетона и железобетона. При этом стоит упомянуть о своеобразной неоднозначности процессов коррозии и гидратации: ранее упоминалось о «*позитивном эффекте коррозии*» (В.И.Соломатов) и «*негативном эффекте поздней гидратации*» (А.В.Волженский).

Учитывая, что выбор наиболее вероятных моделей взаимодействия компонентов любой реальной системы должен строиться по принципу их адекватности натурным наблюдениям и экспериментальным данным, можно считать вполне обоснованным для описания модели системы «бетон-среда» применение вербальных признаков межкомпонентных взаимодействий, соответствующих адаптационно-коррозионному механизму.

Библиографический список

1. Чернявский В.Л. О практическом использовании адаптационных свойств бетона // Бетон и железобетон. – 1998. – №6. – С.24–27.
2. Заславский И.Н., Флак В.Я., Чернявский В.Л. Долговечность зданий и сооружений предприятий черной металлургии. – М.: Стройиздат. – 1979. – 72с.
3. Чернявский В.Л. Повышение антикоррозионных свойств бетона. – Киев: Будівельник. – 1983. – 88с.
4. Москвин В.М. Коррозия бетона. – М.: Госстройиздат. – 1952. – 344с.
5. Чернявский В.Л. Адаптация бетона. – Днепропетровск: Новая Идеология. – 2002. – 116с.

Расчет оптимальных дозировок пластификаторов бетонных смесей с учетом минералогического и вещественного состава цемента

С целью рационального использования эффектов пластификаторов в ресурсосберегающей технологии бетона предложена методика их расчета [1] с учётом количественного, минералогического и вещественного состава цемента в общей схеме расчета эффективного состава бетона при низкой энергоёмкости их изготовления с комплексом строительно-технических свойств. Применение добавок-пластификаторов в настоящее время стало неотъемлемой частью технологического процесса в производстве бетонных смесей благодаря радикальному процессу в исследованиях физико-химических поверхностных явлений и контактных взаимодействий в цементных системах [2]. В то же время назначение дозировок наиболее изученных добавок пластификаторов и суперпластификаторов производится практически произвольно в широких пределах, рекомендуемых различными литературными или нормативными источниками вне связи с химико-минералогическими и вещественными составами применяемых цемента, но с введением дополнительных нестандартизированных лабораторных испытаний, применяемых обычно факультативно только для исследования механизма действия добавок. Например, в [3] приводится способ определения адсорбции суперпластификатора С-3 на гидратирующемся цементе, что существенно осложняет получение достоверных данных ввиду образования из цемента и воды новообразований. Например, поверхность гидратирующихся зерен силикатов кальция (C_3S и C_2S) покроется более толстым слоем адсорбтива по сравнению с цементом, в котором больше минерала C_3A . В этом случае сказывается различие в адсорбционном эффекте минералов цемента, а так же и активных минеральных добавок (АМД). В [2] показано, что величина адсорбции С-3 на различных АМД практически одинакова и составляет порядка $0,1 \text{ м}^2/\text{г}$. Однако для обеспечения желаемого эффекта требуются различные дозировки добавки для цемента, содержащих различные виды АМД, отличающихся гидравлической активностью.

В результате эффективность действия пластификаторов оказывается заниженной и, часто, весьма существенно, т.к. любые отклонения от оптимума приводят к неполному использованию пластифицирующего эффекта добавок, либо к ухудшению качества твердеющего бетона, а в случае дорогих суперпластификаторов - к возможному их перерасходу, т.е. применение таких дозировок, при которых положительный эффект исчерпан, а затраты, следовательно, завышены.

Эмпирическая корректировка назначения дозировок пластификаторов в поточном производстве при изменении характеристик применяемых цемента в ус-

ловиях строительной лаборатории крайне трудоемка, неоперативна и требует более конкретных ориентиров.

Авторами разработана методика расчета оптимальных дозировок пластификаторов диспергирующего действия (в том числе суперпластификаторов) с учетом изменения химико-минералогического и вещественного состава цемента. Методика опробована и дала положительные результаты на ряде заводов Украины [4].

Учитывая, что механизм действия различных пластификаторов имеет свои особенности, то и технология расчетов для различных видов пластификаторов имеет свои отличия. При этом сам принцип решения задачи оптимизации этой группы добавок является общим. Формулировка задачи ставится следующим образом.

На первом этапе определить оптимальную концентрацию добавки (D/C) при которой структурная вязкость цементного теста (η) будет снижена до предела, когда прекращается снижение вязкости цементных систем (раствор, бетон) при условии минимальных потерь прочности цементного камня ($R_{ц.к.}$), т.е.

$$\eta = f(B/C, D/C) \rightarrow \min,$$

где $B/C = F(R_{ц.к.})$ — водоцементное отношение.

На втором этапе производится перерасчет состава бетона (раствора) с учетом водоредуцирующего действия найденной концентрации добавки.

На примере суперпластификатора-разжижителя С-3, как одного из наиболее популярных пластификаторов в технологии бетона, здесь приведен результат решения сформулированной задачи.

Оптимальная дозировка добавки С-3 ($D_{C-3} = \frac{C-3}{C} \cdot 100\%$) может быть просчитана с точностью не менее 5% в зависимости от достоверности данных по составу цемента по формуле:

$$D_{C-3} = 1,47 \left[0,0072(C_3A)^2 - 0,047(C_3A) + 0,329 \right] \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n C_{AMД(i)}}{100} \right) + 0,2585 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lg AMД(i)}{1000} \right)^{2,3} \quad (1)$$

$$\cdot C_{AMД(i)} + 0,034 \frac{S_{ц}}{1000} - 0,1054, \%$$

здесь: C_3A — содержание трехкальциевого алюмината в клинкере, %; $Ig_{AMД(i)}$ — гидравлическая активность i -той активной минеральной добавки $AMД_i$, m^2/g ; $C_{AMД(i)}$ — процентное содержание i -той активной минеральной добавки $AMД_i$, %; $S_{ц}$ — удельная поверхность цемента по Блейну, cm^2/g .

Следует отметить, что в выражении (1) отсутствует влияние гипса в явной форме. Это связано с тем, что, во-первых, оптимальная дозировка гипса коррелируется с содержанием C_3A и $S_{ц}$ и ограничивается по SO_3 , а, во-вторых, здесь в расчете отсутствует величина адсорбции цемента. В случае необходимости дополнительного введения гипса вводится поправка $\Delta D_{C-3} = +0,05$ на каждый процент дополнительно введенного гипса.

Водоредуцирующее действие С-3 на втором этапе решения задачи просчитывается из выражения:

$$\Delta B_{C-3} = \frac{B(C + 40)D_{C-3}}{1740}, \text{ кг/м}^3 \quad (2)$$

где ΔB_{C-3} — снижение водопотребности бетонной смеси от действия С-3, kg/m^3 ; B — начальная водопотребность бетонной смеси, kg/m^3 ; C — начальная потребность в цементе для бетона заданных свойств, kg/m^3 .

Окончательно водопотребность бетонной смеси с введением С-3 определяется:

$$B_{C-3} = B - \Delta B_{C-3}, \text{ кг/м}^3 \quad (3)$$

и далее производится перерасчет состава бетона.

Пример. Требуется определить оптимальную дозировку С-3 при поступлении Здолбуновского цемента ВАТ "Вольт" следующего состава: $C_3A=7,6\%$, опока Рава-Русская ($Ig_{оп}=60mg/g$) в количестве 3%, шлак Криво-рожский ($Ig_{оп}=170mg/g$) в количестве 17%, удельная поверхность 2900 cm^2/g .

А также просчитать снижение расхода цемента и воды в бетоне состава $B=200 \text{ кг/м}^3$; $C=440 \text{ кг/м}^3$ при $B/C=const$. Подставляем данные документа качества цемента в выражение (1):

$$D_{C-3} = 1,47 \left\{ 0,0072 \cdot 7,6^2 - 0,047 \cdot 7,6 + 0,329 \right\} \cdot \left(1 - \frac{3+17}{100} \right) + 0,2585 \cdot \left(\frac{60}{1000} \right)^{2,3} \cdot 3 + 0,2585 \left(\frac{170}{1000} \right)^{2,3} \cdot 17 + 0,034 \frac{2900}{1000} - 0,1054 \left\} = 0,56 \% \text{ от расхода цемента.}$$

Снижение водопотребности (2):

$$\Delta B_{C-3} = \frac{200 \cdot (440 + 40) \cdot 0,56}{1740} = 31 \text{ кг/м}^3$$

$$B_{C-3} = 200 - 31 = 169 \text{ кг/м}^3$$

Требуемое количество цемента для

$$B/C = \frac{200}{440} = 0,45 \text{ при введении С-3 составит:}$$

$$C_{C-3} = \frac{B_{C-3}}{B/C} = \frac{169}{0,45} = 376 \text{ кг/м}^3.$$

Расход добавки в натуральном выражении составит:

$$C-3 = \frac{376 \cdot 0,56}{100} = 2,106 \text{ кг/м}^3.$$

Как видно из приведенного примера, достаточно более полной информации о характеристиках партии цемента, которую заказчик может получить от изготовителя согласно п.3.7.2ДСТУ БВ.2.7-46-96, чтобы оперативно произвести корректировку состава на данную партию цемента.

Аналогичные зависимости разработаны и для других видов добавок, в том числе для лигносульфонатов. Отличие состоит в том, что добавки, полученные из попутных или побочных продуктов различных производств, оказывают побочные действия на процессы гидратации цемента и, в отличие от суперпластификаторов, которые являются заводским продуктом, имеют нестабильный состав. Это необходимо учитывать при получении новой партии таких добавок и вносить корректировки в расчетные зависимости.

Более полная информация о качественных характеристиках цементов позволяет строительной лаборатории производить оперативную корректировку составов бетона без дополнительных лабораторных исследований, а только используя предлагаемую методику.

Минералогический и вещественный состав цемента — определитель, широко известный строителям, в настоящее время рядом заводов-изготовителей цемента практически исключен из документов о качестве (паспорт, сертификат). В лучшем случае указывается химический состав, необходимый для получения клинкера и дающий информацию производителю цемента, но не строителю, так как, кроме содержания вредных примесей, взять ему оттуда нечего. Рекомендуется ввести в действующие стандарты единую форму документа о качестве цемента, согласованную с потребителями.

Библиографический список

1. Шушпанов В.А., Забияка В.В., Ковтун А. М., и др. Методологические аспекты применения комплексных модификаторов в ресурсосберегающей технологии бетона //Бетон и железобетон. — №2. — 1999.
2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М., Стройиздат, 1990. — с.394.
3. Рекомендации по определению содержания суперпластификатора С-3 в жидкой фазе гидратирующегося цемента.- М., 1981. — 57 с.
4. Пластифікатори в безпропарувальній технології бетону і залізобетону. О.М. Ковтун, С.М.Чудновський, Л.А. Кісельова та ін. Будівництво України. — 1995. —№3. — с.34-36.

В.И.БАБИЧ, Д.В.КОЧКАРЕВ, кандидаты техн. наук (Украинский государственный ун-т водного хозяйства и природопользования)

Расчёт элементов железобетонных конструкций деформационным методом

В журнале "Бетон и железобетон" в 2002 г. был опубликован ряд статей, посвящённых расчёту железобетонных элементов по новым нормативным документам. Изложены принципиально новые методы расчета, основанные на универсальных физических и теоретических моделях, учитывающие новейшие достижения отечественной и зарубежной науки, национальных и международных нормативных документов. Безусловно, введение новых документов будет большим шагом вперед, способствующим активизации экспериментальных и теоретических исследований в области железобетона.

В течение нескольких лет мы разрабатывали методику расчёта железобетонных элементов, основанную на деформационной модели. По многим параметрам она совпадает с методикой новых нормативных документов, имея в то же время отдельные отличия, которые, на наш взгляд, упрощают некоторые расчётные положения. Часть наших разработок излагаем в данной статье.

Многочисленные исследования работы железобетонных элементов, проведенные различными исследователями на протяжении многих лет, дают возможность предполагать, что напряженно-деформированное состояние элементов независимо от вида деформаций, уровня напряжений и длительности действия нагрузки изменяется плавно без каких-либо видимых скачков вплоть до разрушения. Следовательно, механическое состояние элементов от начала загрузки и до разрушения может быть описано единой системой уравнений, которая позволит решать задачи прочности, жесткости и трещиностойкости.

Если не учитывать кручения, то систему уравнений механического состояния следует составлять для наиболее общего случая деформаций – косоугольного сжатия. При этом нужно иметь в виду, что при одном и том же расчетном эксцентриситете несущая способность гибкого элемента будет зависеть от способа создания усилий: приложение сжимающей силы на конце элемента с эксцентриситетом; действие осевой силы с моментами на концах стержня; совместное действие осевой силы и поперечного нагружения, т.е. прочность элемента зависит от характера изменения усилий по его длине. Следовательно, расчёт прочности элемента не может сводиться к расчёту наиболее напряжённого сечения, а должен учитывать всю совокупность напряженно-деформируемого состояния по длине элемента.

При составлении системы уравнений, описывающей

напряженно-деформированное состояние сечений, необходимо использовать деформационный метод, учитывающий нелинейность деформирования бетона на основе полной диаграммы деформирования с восходящей и нисходящей ветвями. Поскольку среди исследователей нет общего мнения об аппроксимации диаграммы деформирования, как и о самой диаграмме, в расчетный аппарат, по нашему мнению, нужно вводить наиболее простую зависимость, которая близко описывает процесс деформирования бетона и наиболее пригодна к интегрированию. Критерием правильности принятых зависимостей будет служить соответствие расчетных и экспериментальных параметров элемента.

Для составления системы уравнений используем следующие предпосылки.

1. Рассматриваем железобетонные элементы, у которых влияние поперечной силы на прогибы несущественно, а силовые факторы не вызывают кручения.

2. Справедлива гипотеза плоских сечений. Тогда в результате малости продольных деформаций можно записать

$$\epsilon_{bi} = x_i \frac{1}{\rho}, \quad (1)$$

где x_i – расстояние от нейтральной оси до произвольной точки сечения; ϵ_{bi} – деформации бетона в этой точке; $\frac{1}{\rho}$ – кривизна элемента.

3. При неоднородной эпюре напряжений зависимость между напряжениями и деформациями в сжатом и растянутом бетоне описываются полиномами второй степени:

$$\sigma_{bc} = E_t \epsilon_b + E_c \epsilon_b^2, \quad (2)$$

$$\sigma_{bt} = E_t \epsilon_{bt} + E_t \epsilon_{bt}^2, \quad (3)$$

где E_1, E_c, E_t – коэффициенты полинома, определяемые по формулам:

$$E_1 = \frac{2,4R_b}{\epsilon_{b0}}; E_c = -\frac{1,2R_b}{\epsilon_{b0}^2}; E_t = \frac{E_b^2 - 2E_c E_b}{4R_{bt,ser}}; \quad (4)$$

E_b – начальный модуль упругости бетона; ϵ_{b0} – граничные деформации бетона при осевом сжатии бетонных элементов, принимаемые по данным опытов или по табл.6.51 [1].

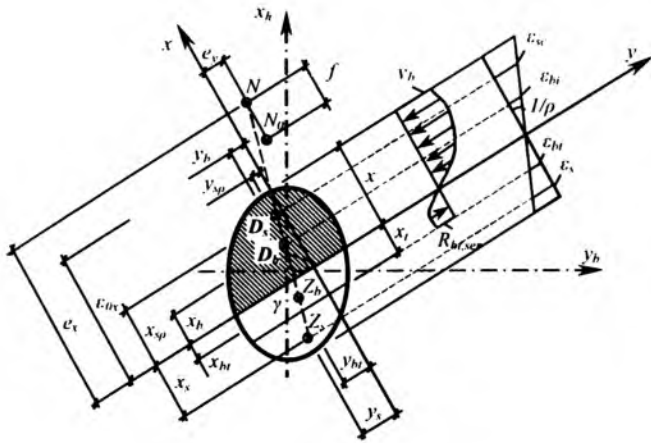


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние железобетонного сечения при косом внецентренном сжатии

4. После образования трещин влияние растянутой зоны бетона на напряженно-деформированное состояние элементов не учитываем.

5. Зависимость между напряжениями и деформациями в арматуре до наступления текучести принимается линейной

$$\sigma_{si} = E_s \varepsilon_{si}. \quad (5)$$

Учитывая формулу (1), запишем напряжения в материалах:

$$\sigma_{bc,i} = E_1 \frac{1}{\rho} x_i + E_c \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 x_i^2; \quad (6)$$

$$\sigma_{bt,i} = E_1 \frac{1}{\rho} x_i + E_t \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 x_i^2; \quad (7)$$

$$\sigma_s = E_s \frac{1}{\rho} x_s; \sigma_{sc} = E_s \frac{1}{\rho} x_{sc}. \quad (8)$$

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние сечения произвольной симметричной формы при косом внецентренном сжатии (рис. 1).

Усилие в бетоне и арматуре сжатой и растянутой зон запишем в виде:

$$D_b = \int \sigma_{bc} dA_{bc}; Z_b = \int \sigma_{bt} dA_{bt}; \quad (9)$$

$$D_s - Z_s = \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si}. \quad (10)$$

Составим условия равновесия усилий относительно осей x-y, одна из которых проходит по нейтральной линии, а другая – перпендикулярно к ней через наиболее удаленную сжатую точку сечения. Учитывая формулы (9) и (10), система уравнений равновесия примет вид:

$$\int_{A_{bc}} \sigma_{bc} dA_{bc} - \int_{A_{bt}} \sigma_{bt} dA_{bt} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0;$$

$$\int_{A_{bc}} \sigma_{bc} x_i dA_{bc} + \int_{A_{bt}} \sigma_{bt} x_{t,i} dA_{bt} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} x_{si} - N(e_{x0} + f) = 0; \quad (11)$$

$$\int_{A_{bc}} \sigma_{bc} y_i dA_{bc} + \int_{A_{bt}} \sigma_{bt} y_{t,i} dA_{bt} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} y_{si} - N e_y = 0.$$

Подставим в систему (11) значение напряжений в материалах из формул (6-8) и введем обозначения:

$$S_{bc,y} = \int_{A_{bc}} x_i dA_{bc}; \quad S_{bt,y} = \int_{A_{bt}} x_{t,i} dA_{bt}; \quad (12)$$

$$I_{bc,y} = \int_{A_{bc}} x_i^2 dA_{bc}; \quad I_{bt,y} = \int_{A_{bt}} x_{t,i}^2 dA_{bt};$$

$$I_{bc,xy} = \int_{A_{bc}} x_i y_i dA_{bc}; \quad I_{bt,xy} = \int_{A_{bt}} x_{t,i} y_{t,i} dA_{bt}; \quad (13)$$

$$S_{red,y} = S_{bc,y} - S_{bt,y} + \alpha_{s1} \sum_{i=1}^n A_{si} x_{si}; \quad (14)$$

$$I_{red,y} = I_{bc,y} + I_{bt,y} + \alpha_{s1} \sum_{i=1}^n A_{si} x_{si}^2; \quad (15)$$

$$I_{red,xy} = I_{bc,xy} - I_{bt,xy} + \alpha_{s1} \sum_{i=1}^n A_{si} x_{si} y_{si}; \quad (16)$$

$$\bar{S}_{bc,y} = \int_{A_{bc}} x_i^3 dA_{bc}; \quad \bar{S}_{bt,y} = \int_{A_{bt}} x_{t,i}^3 dA_{bt}; \quad (17)$$

$$\bar{I}_{bc,x^2y} = \int_{A_{bc}} x_i^2 y_i dA_{bc}; \quad \bar{I}_{bt,x^2y} = \int_{A_{bt}} x_{t,i}^2 y_{t,i} dA_{bt}. \quad (18)$$

В формулах (12...18):

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_1}; \quad (19)$$

$S_{bc,y}, S_{bt,y}, I_{bc,y}, I_{bt,y}, I_{bc,xy}, I_{bt,xy}, S_{red,y}, I_{red,y}, I_{red,xy}$ - известные геометрические характеристики: статические моменты, моменты инерции площади сжатого и растянутого бетона, приведенного сечения относительно осей координат;

$\bar{S}_{bc,y}, \bar{S}_{bt,y}$ - статические моменты высшего порядка соответственно площади сечения сжатой и растянутой без трещин частей бетона относительно оси y, см⁵;

$\bar{I}_{bc,x^2y}, \bar{I}_{bt,x^2y}$ - моменты инерции второго порядка соответственно площади сечения сжатой и растянутой без трещин частей бетона, см⁵.

Учитывая формулы (12-19), систему уравнений (11) запишем в таком виде:

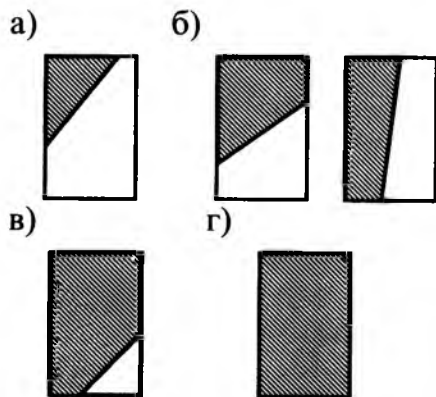


Рис. 2. Формы сжатой зоны прямоугольного сечения
а — треугольник; б — трапеция; в — пятиугольник; г — полностью сжатое сечение

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 (E_c I_{bc,y} - E_t I_{bt,y}) + \frac{1}{\rho} E_t S_{red,y} = N;$$

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 (E_c \bar{S}_{bc,y} + E_t \bar{S}_{bt,y}) + \frac{1}{\rho} E_t I_{red,y} = N(e_{0x} + f); \quad (20)$$

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 (E_c \bar{I}_{bc,x^2y} - E_t \bar{I}_{bt,x^2y}) + \frac{1}{\rho} E_t I_{red,xy} = Ne_y.$$

Полученная система уравнений описывает напряженно-деформированное состояние не только кососжатых железобетонных стержней, но и элементов, которые испытывают косое внецентренное растяжение, косой и плоский изгиб, внецентренное сжатие и растяжение при любых уровнях нагружения. При этом в зависимости от вида деформаций правые части системы поддают соответствующим образом:

а) при косом внецентренном растяжении в первом уравнении N , а во втором уравнении f принимают со знаком минус;

б) при косом изгибе в правой части принимают (см.рис.1);

$$N = 0;$$

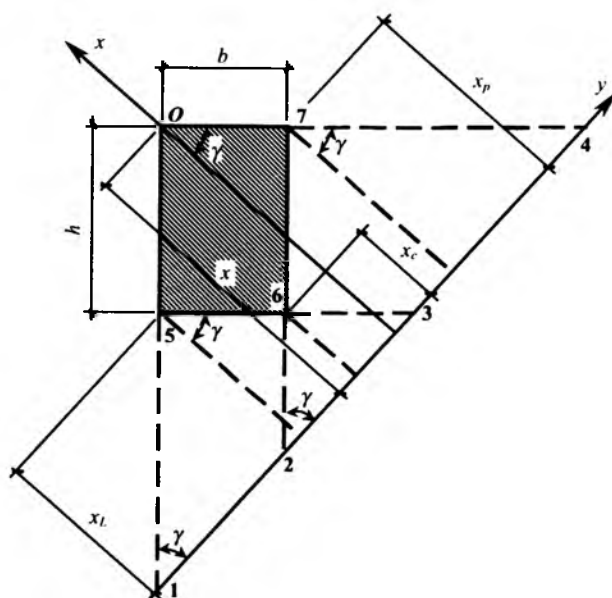
$$N(e_{0x} + f) = M_{xh} \text{Sin} \gamma + M_{yb} \text{Cos} \gamma;$$

$$Ne_y = M_{xh} \text{Cos} \gamma - M_{yb} \text{Sin} \gamma;$$

в) при внецентренном сжатии и растяжении, а также при плоском изгибе достаточно двух первых уравнений системы (20) с учетом пунктов а) и б).

Для расчета железобетонных элементов с использованием системы (20) необходимо определить геометрические характеристики сечений в зависимости от положения нейтральной линии (ось y) в сечении. Так, для элементов прямоугольного сечения возможны четыре формы сжатой зоны бетона: треугольная, трапецидальная, пятиугольная, полностью сжатое сечение (рис.2).

Все перечисленные выше геометрические харак-



$$S_i = S_{0-1-4} - S_{1-3-5} - S_{2-4-7} + S_{2-3-6}$$

Рис.3. К определению геометрических характеристик сечения при полностью сжатом сечении

теристики бетонных сечений определяем как алгебраическую сумму фиктивных треугольников так, чтобы в результате сложения вышла геометрическая характеристика сжатой зоны. Для полностью сжатого сечения относительно оси y (условная нейтральная ось) вычисление геометрических характеристик иллюстрируется рис.3.

В результате вычислений получаем:

$$S_{bc,y} = \frac{x^3 - x_p^3 - x_L^3 + x_c^3}{3 \text{Sin} 2\gamma}; \quad (21)$$

$$I_{bc,y} = \frac{x^4 - x_p^4 - x_L^4 + x_c^4}{6 \text{Sin} 2\gamma}; \quad (22)$$

$$\bar{S}_{bc,y} = \frac{x^5 - x_p^5 - x_L^5 + x_c^5}{10 \text{Sin} 2\gamma}; \quad (23)$$

$$I_{bc,xy} = -\frac{x^4 - x_p^4 - x_L^4 + x_c^4}{6 \text{Sin} 2\gamma \text{tg} 2\gamma} + \frac{b(x_c^3 - x_p^3)}{6 \text{Cos} \gamma} + \frac{h(x_L^3 - x_c^3)}{6 \text{Sin} \gamma}; \quad (24)$$

$$\bar{I}_{bc,x^2y} = -\frac{x^5 - x_p^5 - x_L^5 + x_c^5}{15 \text{Sin} 2\gamma \text{tg} 2\gamma} + \frac{b(x_c^4 - x_p^4)}{12 \text{Cos} \gamma} + \frac{h(x_L^4 - x_c^4)}{12 \text{Sin} \gamma}. \quad (25)$$

Вид деформаций	Авторы исследований	Количество образцов	Статистические показатели				
			Среднее арифметическое, %	Стандартное отклонение, %	Коэффициент эксцесса	Коэффициент асимметрии	Доверительный интервал (95%)
Плоский и косой изгиб	Жень-Бей-Юй, Н.И. Смолин [2]	20	3,77	6,09	-0,42	-0,13	2,85
Внецентренное сжатие	К.Э. Таль, Е.А. Чистяков [3]	39	-3,81	9,26	-0,43	0,47	3,00
Косое внецентренное сжатие	В.И. Бабич [4], С.Д. Семенюк [5]	49	2,03	8,86	-0,23	-0,05	2,54
Внецентренное и косое внецентренное сжатие с переменными эксцентриситетами по длине стержня	К.Э. Таль, Е.А. Чистяков [6], С.В. Бабич [7], В.В. Ризак [8], С.Д. Семенюк [5]	47	-2,62	11,82	-0,07	-0,09	3,47
Осевое сжатие с кривым изгибом	Д.В. Кочкарёв [9]	21	-0,63	8,67	-1,21	0,36	3,95
Внецентренное растяжение	А.М. Чижов [10]	16	3,27	6,39	3,80	-1,53	3,41
Всего		192	-0,30	9,67	-0,09	-0,18	1,75

В формулах (21...25) x , x_p , x_L , x_c - высоты треугольников 0-1-4, 2-4-7, 1-3-5, 2-3-6, которые вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned} x_L &= x - h \operatorname{Sin} \gamma; & x_p &= x - b \operatorname{Cos} \gamma, \\ x_c &= x - b \operatorname{Cos} \gamma - h \operatorname{Sin} \gamma; \end{aligned} \quad (26)$$

Если значение $x_c \leq 0$, принимаем его равным нулю, по формулам (21...25) можно определить геометрические характеристики при сжатой зоне пятиугольник, если $x_c \leq 0$ и $x_L \leq 0$, - при сжатой зоне трапеция, а если $x_c \leq 0$, $x_L \leq 0$ и $x_p \leq 0$, - при сжатой зоне треугольник.

Геометрические характеристики приведенного сечения состоят из геометрических характеристик сечения бетона и сечения арматуры. Независимо от формы сжатой зоны геометрические характеристики сечения арматуры:

$$S_{s,y} = \sum_{i=1}^n A_{si} (x - h_i \operatorname{Sin} \gamma - b_i \operatorname{Cos} \gamma) \quad (27)$$

$$I_{s,y} = \sum_{i=1}^n A_{si} (x - h_i \operatorname{Sin} \gamma - b_i \operatorname{Cos} \gamma)^2; \quad (28)$$

$$I_{s,xy} = \sum_{i=1}^n [A_{si} (x - h_i \operatorname{Sin} \gamma - b_i \operatorname{Cos} \gamma) \times (b_i \operatorname{Sin} \gamma - h_i \operatorname{Cos} \gamma)] \quad (29)$$

где h_i и b_i - расстояния от наиболее сжатой грани соответственно по сторонам h и b сечения до i -того стержня арматуры.

Геометрические характеристики сечения бетона растянутой зоны без трещин вычисляют по тем же принципам, что и для сжатой зоны.

Система уравнений (20) позволяет выполнять расчеты прочности (определение несущей способности, вычисление площади сечения арматуры, проверку прочности), определять момент образования трещин, вычислять прогибы элемента на любом уровне нагружения. При соответствующей доработке с помощью системы можно будет находить ширину раскрытия нормальных трещин, т.е. решать все задачи расчета нормальных сечений и элементов железобетонных конструкций.

Расчитывая прогибы элементов, воспринимающих косой изгиб, косое внецентренное сжатие и растяжение, следует иметь в виду, что по длине элемента изменяются не только значение прогибов, но и их направление, т.е. прогибы располагаются в какой-то криволинейной поверхности. Это необходимо учитывать при вычислении кривизны элемента $1/\rho$.

Для расчета железобетонный стержень по длине делят на несколько участков (не меньше десяти) одинаковой длины, для которых определяют необходимые геометрические параметры и вычисляют усилия, исходя из расчетной схемы элемента. Записывают для каждого участка систему уравнений (20), решая которую получают для каждого сечения высоту сжатой зоны x , кривизну $1/\rho$ и угол наклона нейтральной линии γ . Используя один из методов (трапеций, Сипсона, графоаналитический) вычисляют прогибы элемента в каждом сечении и уточняют расчетные эксцентриситеты, после чего расчеты повторяют, постепенно изменяя один из расчетных факторов (внешнее усилие или площадь сечения арматуры), и так до тех пор, пока на всех участках система (20) будет иметь решения. За критерий разрушения принимаем отсутствие решения системы (20) на одном из участков, что свидетельствует о нару-

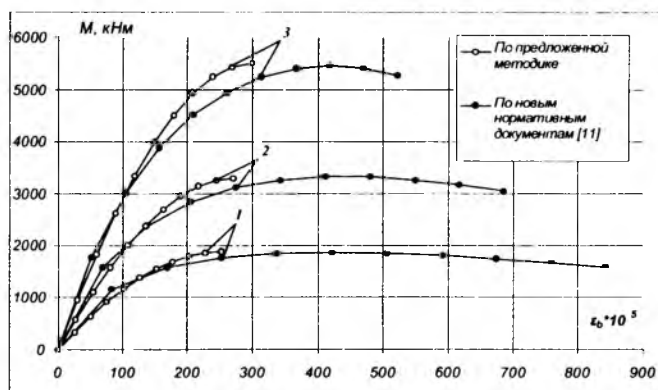


Рис.4. Несущая способность балок, армированных сталью класса А800, при бетонах класса: 1-В10; 2- В20; 3-В40

шении равновесия между внешними силами и внутренними усилиями, т.е. $\frac{dN}{d\left(\frac{1}{\rho}\right)} = 0$.

По изложенной методике была составлена программа расчета железобетонных элементов на персональном компьютере и выполнены расчеты несущей способности 192 элементов, испытанных различными исследователями. Обобщенные статистики сравнения экспериментальной и расчетной несущей способности представлены в таблице.

Выполненные расчёты дают основание считать, что предложенный метод с достаточной точностью отображает реальные данные по несущей способности, и надеяться, что он с такой же точностью смоделирует процессы жесткости и трещиностойкости. Для этого следует провести обработку соответствующих экспериментальных данных. Отметим, что описанный метод, проверенный на экспериментальных данных кратковременных испытаний, годится для расчета железобетонных элементов при длительном действии нагрузки. Для этого необходимо в расчетный аппарат вместо предельных деформаций бетона при осевом сжатии ϵ_{b0} , ввести предельные деформации бетона осевому сжатию при длительном нагружении $\epsilon_{b0,l}$, а вместо R_b ввести $R_{b,l}$.

Несмотря на принятую простоту зависимости между напряжениями и деформациями в бетоне (формулы 2 и 3) расчетный аппарат вышел сложным и может быть реализован только с использованием ЭВМ. Следовательно, принятие более сложной зависимости $\sigma_b - \epsilon_b$ существенно усложнит расчетный аппарат, но вряд ли повысит точность расчётов. В настоящее время разработаны упрощенные методики деформационного метода, которые по сложности вычислений не превышают методики действующих норм проектирования железобетонных конструкций, а по точности не уступают вышеизложенному методу.

Основными отличиями предложенного расчёта от метода, изложенного в [11], являются: введение более простой зависимости $\sigma_b - \epsilon_b$; учёт напряжённо-деформированного состояния ряда сечений по длине элемента, а не наиболее напряжённого сечения; принятие за

критерий прочности не достижение предельных относительных деформаций материалов, а экстремум функции $N - \epsilon$, т.е. $dN/d\epsilon = 0$.

Введение зависимостей (2 и 3) позволило проинтегрировать уравнение напряжённого состояния и получить систему (20), используя которую можно решать задачи прочности, жесткости и трещиностойкости.

Проведённые расчёты изгибаемых элементов сечением 15x25 см, $\mu = 1,5\%$ по новым нормативным документам показывают, что во многих случаях несущая способность, определённая при предельных деформациях материалов, не есть наибольшая для данного элемента (рис.4). В то же время несущая способность по предложенной методике и максимальная по [11] очень близки.

Широкому внедрению деформационного метода расчета железобетонных конструкций будут способствовать более глубокие исследования деформативных свойств бетонов и нормирование предельной деформации бетонов осевому сжатию ϵ_{b0} и $\epsilon_{b0,l}$ в зависимости от класса бетона. Имеющиеся в литературе расхождения в значениях предельных деформаций бетона вызваны, на наш взгляд, несовершенством методики испытаний.

Библиографический список

1. Гольшев А.Б. и др. Проектирование железобетонных конструкций: Справочное пособие. – К.: Будівельник, 1990. – 544 с.
2. Глазер С.И. Расчет косоизгибаемых железобетонных элементов. – Киев: Будівельник. – 1973. – 211 с.
3. Таль К.Э., Чистяков Е.А. Исследование несущей способности гибких железобетонных колонн, работающих по первому случаю внецентренного сжатия // Расчёт железобетонных конструкций. Экспериментально-теоретические исследования по усовершенствованию расчёта. Труды института НИИЖБ. Вып.23. - М.: Госстройиздат, 1961. - С.25-78.
4. Бабич В.И. Экспериментально-теоретические исследования работы гибких железобетонных элементов прямоугольного сечения на косо внецентренное сжатие. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Львов, 1972. – 191 с.
5. Семенюк С.Д. Исследования косо сжимаемых керамзитожелезобетонных элементов. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Ровно, 1980. – 205 с.
6. Таль К.Э., Чистяков Е.А. Экспериментальное исследование несущей способности гибких железобетонных стержней при продольно-поперечной нагрузке // Влияние скорости нагружения, гибкости и крутящих моментов на прочность железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1970. – С. 98–110.
7. Бабич С.В. Работа та несуча здатність стиснутих залізобетонних елементів із різними ексцентриситетами на кінцях. Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Рівне, 1998. – 193 с.
8. Різак В.В. Работа та несуча здатність стиснуто-згнутих залізобетонних елементів за короткочасного навантаження. Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Рівне, 2000. – 175 с.
9. Кочкаръов Д.В. Напружено-деформований стан та несуча здатність залізобетонних елементів за дії осьової стискувальної сили та згину в двох площинах. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Рівне, 2002. – 191 с.
10. Чижов А.М. Экспериментальная проверка прочности железобетонных балок // Бетон и железобетон. – 1963. – № 12.
11. Звездов А.И., Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. О новых нормах проектирования железобетонных и бетонных конструкций // Бетон и железобетон. – 2002. – № 2. – С. 2–6.

Влияние трещинообразования на периоды собственных колебаний железобетонных стоек

Как известно, в железобетонных элементах нелинейные деформации проявляются уже после появления трещин в растянутых зонах.

Для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов жесткость сечений до появления трещин равна

$$B = \varphi E_b I. \quad (1)$$

А на участках с трещинами там, где ядровый момент внешних сил больше момента трещинообразования т.е.

$$M_r = N(e_o - r) > M_{cr} = R_{bt,ser} W_{pl} - N_{shr}(e_{op} + r) \quad (2)$$

жесткость сечений равна

$$B_{cr} = \frac{e_o h_o z}{\frac{\psi_s(e_s - z)}{E_s A_s} + \frac{\psi_b e_s}{(\varphi_f + o) n E_b b h_o}}. \quad (3)$$

Здесь и далее обозначения приняты по [1].

Рассмотрим симметрично армированные стойки прямоугольного сечения длиной l , на которые действуют постоянная по величине осевая сила p и горизонтальная сила S , значение которой растет от 0 до S_{max} (рис. 1, а), под действием которых определена площадь арматур $A_s = A_s'$ (рис.1). Стойки соответствуют параметрам железобетонных колонн одноэтажных прозданий высотой 9.75 м.

На нижнем участке колонн длиной l_{cr} , где имеются трещины, жесткость определяется по формуле (3). На верхнем участке длиной $l - l_{cr}$ трещин нет и жесткость определяется по формуле (1) (рис. 1, б). С увеличением силы S длина l_{cr} увеличивается. Горизонтальное смещение верха колонны будет

$$f = \int_0^{l_{cr}} M_x \left(\frac{1}{r_x} \right)_{cr} dx + \int_{l_{cr}}^l M_x \left(\frac{1}{r_x} \right) dx. \quad (4)$$

Нормальная сила на колонны первых двух зданий бралась $N=328$ кН – равной опорной реакции железобетонного типового покрытия пролетом 18 м и шагом

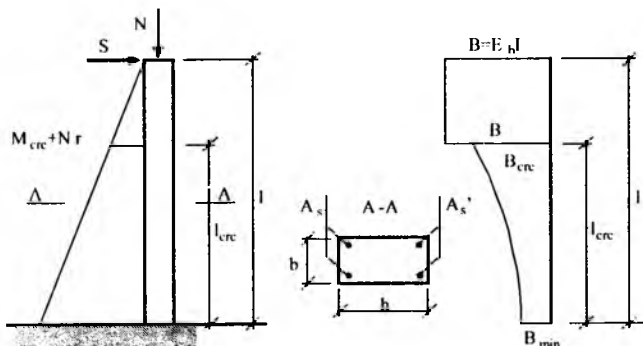


Рис. 1 Расчетная схема колонн

колонн 6 м, для двух других зданий $N=238,5$ кН – равна опорной реакции металлических конструкций покрытия. Размеры колонн 40x80 см, бетон тяжелый классов В15 и В30, арматура симметричная ($A_s = A_s'$) класса А-III заделана в нижнем сечении колонн и не прерывается по их длине.

Максимальное значение горизонтальной силы принято равной сейсмической силе, определенной по нормам [2].

На рис. 2 показана полученная по формуле (4) зависимость смещения верха колонн от горизонтальной силы в относительных координатах. Видно, что после появления первых трещин при нагрузках, составляющих примерно 20% от S_{max} , жесткости стоек сильно падают.

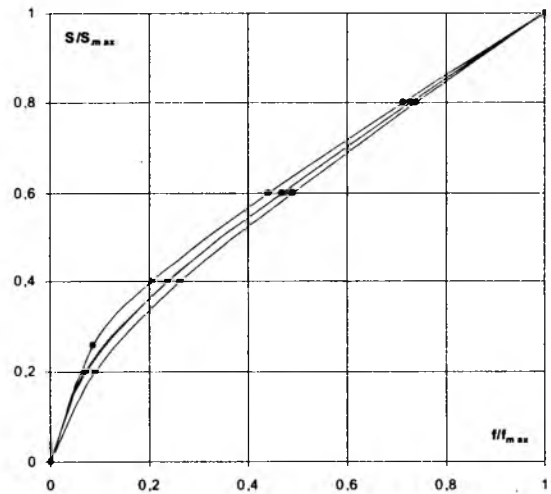


Рис. 2 Зависимость $f-S$

С увеличением силы S растут длины участков колонн, имеющих трещины - l_{cr} (рис. 3), и при $S=S_{max}$ $l_{cr} = (0,75...0,85)l$ [3]. Т.е. с увеличением горизонтальной нагрузки растет длина части колонны l_{cr} с малой жесткостью B_{cr} . Кроме того, уменьшается и величина B_{cr} в связи с увеличением изгибающего момента, а длина зоны $l - l_{cr}$ с постоянной по величине жесткостью B уменьшается, что и приводит к уменьшению жесткости колонн в целом. При знакопеременном нагружении горизонтальной силой сжатые и растянутые зоны меняются местами, что сказывается на жесткости частей колонн, имеющих трещины.

В [4] показано, что горизонтальное смещение верха стоек можно определить по формуле (4), умножив первый член на коэффициент 1,15, учитывающий снижение жесткости из-за наличия сквозных трещин.

Метал. перекрытие В30, $A_s=A_s'=25,6 \text{ см}^2$				Железоб. перекрытие В15, $A_s=A_s'=31,5 \text{ см}^2$				Железоб. перекрытие В30, $A_s=A_s'=35,1 \text{ см}^2$			
S	T	F	T/T_{max}	S	T	F	T/T_{max}	S	T	F	T/T_{max}
кН	С	См	—	кН	С	См	—	кН	С	См	—
19,62	0,695	1,01	0,583	18,69	1,03	1,32	0,673	20,96	0,821	0,94	0,598
30,63	0,857	2,41	0,719	37,39	1,24	3,84	0,810	41,91	1,06	3,14	0,772
45,94	1,02	5,13	0,857	56,08	1,38	7,16	0,903	62,87	1,21	6,18	0,884
61,25	1,13	8,28	0,943	74,78	1,47	10,8	0,961	83,82	1,31	9,58	0,954
76,57	1,19	11,6	1	93,47	1,53	14,6	1	104,8	1,37	13,2	1

Для определения периода собственных колебаний колонн с учетом фактических жесткостей из-за наличия трещин сначала определим единичное перемещение

$$D = 1,15 \int_0^{l_{crc}} \frac{(\overline{M}_x)^2}{B_{x,crc}} dx + \int_{l_{crc}}^l \frac{(\overline{M}_x)^2}{B} dx \quad \text{или} \quad D = \frac{f}{S}, \quad (5)$$

Затем период

$$T = 2\pi \sqrt{m/a}, \quad \text{где} \quad a = 1/\delta. \quad (6)$$

Расчетные значения периодов собственных колебаний смещений верха и единичных перемещений под действием сил $S_i = (0,2 \dots 1,0) S_{max}$ приведены в таблице.

Из нее видно, что с увеличением силы, вынуждающей колонну колебаться, уменьшается ее жесткость и увеличивается период собственных колебаний.

Если отклонить колонну с силой S_{max} и отпустить, то она сначала будет колебаться с периодом t_{max} , затем в процессе затухания колебаний произойдет уменьшение смещения f и, как следствие, уменьшается длина l_{crc} , увеличивается длина $l - l_{crc}$, из-за чего будет увеличиваться жесткость колонны в целом и уменьшаться период собственных колебаний колонн.

Очевидно, что при постоянном значении декремента колебаний одновременно будет иметь место постепенное уменьшение периодов на вполне определенную величину. Процесс уменьшения периодов собственных колебаний будет протекать вплоть до момента закрытия трещин по всей длине, после чего период останется

постоянным по величине вплоть до полного затухания колебаний. Заметное увеличение периода колебаний зданий, связанное с уменьшением жесткости системы в течение интенсивной фазы сейсмического воздействия, характерно и отмечалось неоднократно, в частности, в [5]. Аналогичная картина получается и в многоэтажных каркасных зданиях [6].

С течением времени происходит нарастание прочности бетона, а вместе с ним и модуля деформаций, из-за чего увеличивается и жесткость конструкций. Жесткость $B = E_b I$ растет пропорционально E_b , а B_{crc} растет в меньшей степени только из-за изменения второго члена в знаменателе формулы (3).

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

Периоды собственных колебаний железобетонных элементов зависят также от величин усилий, вызывающих колебание, что объясняется снижением жесткости железобетонных элементов после появления трещин ($B_{crc} < B$). Если в железобетонном элементе имеются трещины, то в процессе затухания колебаний эти трещины закрываются, и период собственных колебаний конструкции уменьшается.

Значение периода собственных колебаний при нормативных нагрузках может быть больше периода упругих колебаний на 30...50%. При увеличении нормальной силы изменение периодов после появления трещин уменьшается. Из-за старения бетона периоды собственных колебаний железобетонных элементов уменьшаются.

Библиографический список

1. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. М., 2002.
2. СНРА II-2.02-94 Строительные нормы Республики Армения. Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования, Ереван, 1995.
3. Аветисян Р.С. Влияние неупругих свойств железобетона на его динамические характеристики // Сборник научных трудов ЕрГУАС, том III, Ереван 2003.
4. Хачиян Э.Е., Мелкумян М.Г., Аветисян Р.С., Дадаян Т.Л. Оценка точности расчета жесткости и динамических характеристик железобетонных стоек // Бюллетень Строителей Армении, Ереван, №12 (29), 1998.
5. Болотин В.В., Радин В.П., Чирков В.П. Упругопластический анализ несущих элементов зданий и сооружений при интенсивных сейсмических воздействиях. // Известия ВУЗов "Строительство". Новосибирск., №6 (522), 2002
6. Аветисян Р.С., Дадаян Т.Л., Варданян А.А. Перемещение каркасных зданий при сейсмическом воздействии // Промышленное и гражданское строительство. — №3. — 2001.

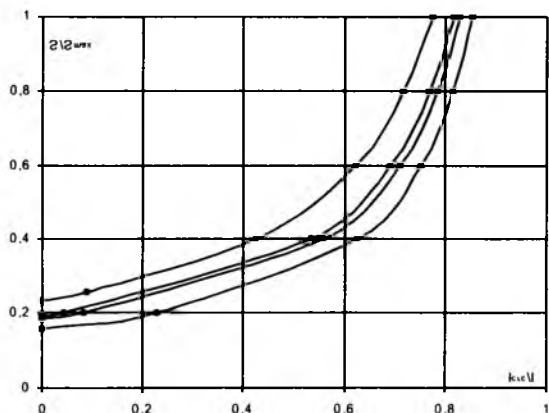


Рис. 3 Изменение длин участков колонн с трещинами при нагружении

С.В.БАКУШЕВ, д-р техн. наук, доц. (Пензенский государственный ун-т архитектуры и строительства)

Геометрически нелинейный вариант деформационной теории пластичности бетона

Уравнения линейной теории упругости и построенные на её основе уравнения теорий пластичности являются теоретической основой прочностного и деформационного расчёта строительных конструкций, выполненных из того или иного материала. Модель линейной теории упругости основывается на достаточно сильных предположениях (идеальная упругость материала, линейная зависимость между напряжениями и деформациями, сплошность, однородность и изотропность идеально упругого тела, допущение о естественном ненапряжённом состоянии твёрдого тела и так далее), которые весьма значительно ограничивают её практическое использование. Бетон, вообще говоря, не удовлетворяет ни одному из допущений линейной теории упругости. Отсюда следует, что в основе расчёта строительных конструкций, выполненных из бетона и железобетона, должна лежать общая (нелинейная) теория напряжений и деформаций. Общая (нелинейная) теория упругости, в частности, теория упругости В.В.Новожилова, основывается лишь на предположении о сплошности и однородности деформируемого твёрдого тела.

Рассмотрим математическую модель сплошной среды, уравнения состояния которой описываются деформационной теорией пластичности бетона [1]

$$T = G_0 \left(1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) \Gamma; \quad \sigma = 3K_0 \left(\varepsilon + q\Gamma^2 \left(1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) \right) \quad (1)$$

Здесь G_0 – начальный модуль сдвига при чистом сдвиге; K_0 – начальный коэффициент объёмного расширения-сжатия; q – модуль дилатации; $\Gamma_s = \Gamma_c k_\lambda$ – предельная интенсивность деформаций сдвига; Γ_c – предельная интенсивность деформаций

сдвига при чистом сдвиге; $k_\lambda = \frac{1}{2} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4})$;

$\lambda = -f \frac{\sigma}{T}$; $f = \frac{3T_c(R_c - R_p)}{R_c R_p}$ – аналог коэффициента

внутреннего трения; R_c – предел прочности при одноосном сжатии; R_p – предел прочности при одноосном

растяжении; $T_c = \sqrt{\frac{1}{3} R_c R_p}$ – предел прочности при чистом сдвиге.

$$\sigma = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}; \quad \varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz};$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} +$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}$$

Математическая модель (1) позволяет описать основные закономерности деформирования бетона, в частности влияние среднего напряжения на вид зависимостей между вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций, зависимость предельной интенсивности деформаций сдвига от вида напряжённого состояния, явление дилатации, а также реализует возможность непосредственного перехода от зависимостей напряжения-деформации к условию прочности бетона.

Запись соотношений (1) в форме перекрёстных зависимостей между первыми и вторыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций

$T = T(\varepsilon, \Gamma)$ $\sigma = \sigma(\varepsilon, \Gamma)$ имеет вид

$$T = G\Gamma; \quad \sigma = 3K\varepsilon, \quad (2)$$

где $G = G_0 D$, $K = K_0 D \left(1 + q \frac{\Gamma^2}{\varepsilon} \right)$ причём

$$D = 1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_c} \left\{ \sqrt{\left[f \frac{K_0}{G_0} \left(\frac{\varepsilon}{\Gamma} + q\Gamma \right) \right]^2 + 4} - f \frac{K_0}{G_0} \left(\frac{\varepsilon}{\Gamma} + q\Gamma \right) \right\}^{-1}$$

Для возможности использования физических соотношений (2) для бетонов с учётом геометрической нелинейности в смысле Новожилова В.В. (геометрические соотношения записываются с учётом квадратичных слагаемых, а статические уравнения записываются для деформированного элементарного параллелепипеда) примем гипотезу об эквивалентности формы записи замыкающих уравнений [2]. Суть этой гипотезы состоит в том, что форма записи зависимостей между инвариантами тензоров деформаций и напряжений в геометрически линейных средах и форма записи зависимостей между инвариантами тензоров деформа-

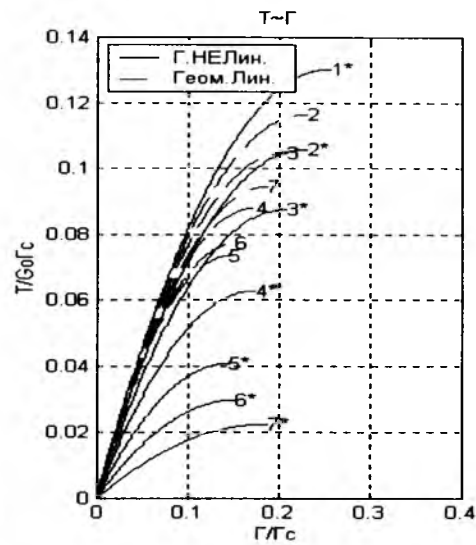
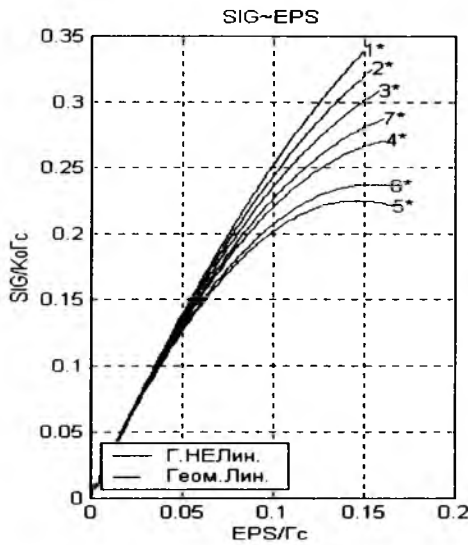


Рис.1. Диаграммы растяжения

ций и обобщённых напряжений в геометрически нелинейных средах одинакова. Тогда физические зависимости для геометрически нелинейной модели деформационной теории пластичности бетона будут иметь следующий вид

$$\sigma^* = 3K^* \varepsilon^*, \quad T^* = G^* \Gamma^*. \quad (3)$$

Здесь $K^* \Leftrightarrow K$, $G^* \Leftrightarrow G$ (знак \Leftrightarrow означает тождество по форме);

$$\sigma = \sigma_{xx}^* + \sigma_{yy}^* + \sigma_{zz}^*, \quad \varepsilon = \varepsilon_{xx}^* + \varepsilon_{yy}^* + \varepsilon_{zz}^*;$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{xx}^* - \sigma_{yy}^*)^2 + (\sigma_{yy}^* - \sigma_{zz}^*)^2 +$$

$$+ (\sigma_{zz}^* - \sigma_{xx}^*)^2} + 6(\sigma_{xy}^{*2} + \sigma_{yz}^{*2} + \sigma_{zx}^{*2});$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*)^2 + (\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{zz}^*)^2 +$$

$$+ (\varepsilon_{zz}^* - \varepsilon_{xx}^*)^2} + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^{*2} + \varepsilon_{yz}^{*2} + \varepsilon_{zx}^{*2}).$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \dots, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \dots;$$

$$\varepsilon_{xx}^* = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right], \quad \dots;$$

$$\varepsilon_{xy}^* = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \dots$$

Обобщённые напряжения σ_{ij}^* связаны с истинными напряжениями σ_{ij} , действующими на площадках,

которые до деформации были перпендикулярны осям декартовой системы координат, известными соотношениями [3]:

$$\sigma_{ij}^* = k_{ij} \sigma_{ij}; \quad k_{ij} = \frac{1}{1 + E_j} \cdot \frac{S_i^*}{S_j};$$

$$E_j = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{jj}^*} - 1; \quad S_i^* = S_j \sqrt{(1 + 2\varepsilon_{jj}^*)(1 + 2\varepsilon_{kk}^*) - \varepsilon_{jk}^{*2}}.$$

- не суммировать; $i, j, k = 1, 2, 3$ – круговая перестановка индексов.

Оценить степень влияния учёта геометрической нелинейности в физических уравнениях (в соответствии с гипотезой об эквивалентности формы записи замыкающих уравнений) можно путём сопоставления графиков объёмного $\sigma = \sigma(\varepsilon, \Gamma)$ и сдвигового $T = T(\varepsilon; \Gamma)$ деформирования, построенных с учётом и без учёта геометрической нелинейности. На рис.1 представлены соответствующие диаграммы при двухосном растяжении ($\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0, \varepsilon_3 = 0$); на рис.2 – при двухосном сжатии ($\varepsilon_1 < 0, \varepsilon_2 < 0, \varepsilon_3 = 0$).

Построение графиков $\sigma = 3K\varepsilon$ и $T = G\Gamma$ для геометрически линейной модели деформационной теории пластичности бетона (на рис.1,2 это пунктирные кривые, отмеченные просто цифрами) выполнено по соотношениям (2). Графики $\sigma^* = 3K^*\varepsilon^*$ и $T^* = G^*\Gamma^*$ для геометрически нелинейной модели деформационной теории пластичности бетона (на рис.1,2 это сплошные кривые, отмеченные цифрами со звёздочками) построены в координатах $\sigma \sim \varepsilon$ и $T \sim \Gamma^*$ (для возможности сопоставления с графиками $\sigma = 3K\varepsilon$ и $T = G\Gamma$).

В терминах истинных напряжений, в соответствии с работой [4], замыкающие уравнения (3), записываемые в главных осях, имеют вид

$$\sigma = 3K_i^* \varepsilon^*; \quad T = G_i^* \Gamma^*. \quad (4)$$

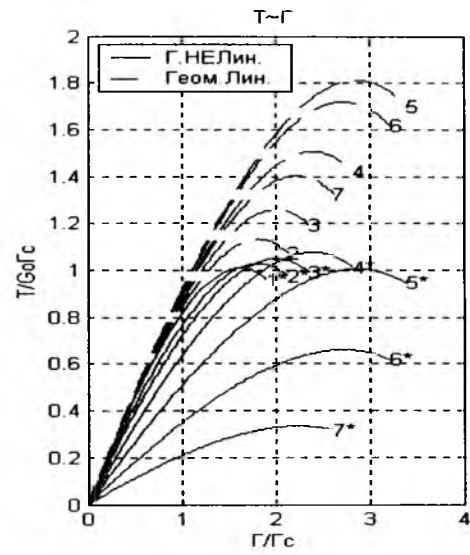
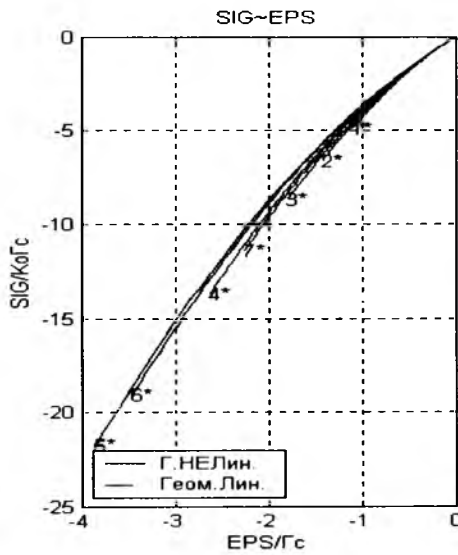


Рис.2. Диаграммы сжатия

Здесь

$$K_i^* = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \right) \left(K^* - \frac{2}{3} G^* \right) + \frac{2}{\alpha} G^* \left(\frac{1}{k_1} + \frac{\alpha_{21}}{k_2} + \frac{\alpha_{31}}{k_3} \right) \right]$$

$$G_i^* = \frac{1}{2\beta} \left\{ \left[\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right) \left(K^* - \frac{2}{3} G^* \right) \alpha + \frac{2}{\alpha} G^* \left(\frac{1}{k_1} - \frac{\alpha_{21}}{k_2} \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_3} \right) \left(K^* - \frac{2}{3} G^* \right) \alpha + \frac{2}{\alpha} G^* \left(\frac{\alpha_{21}}{k_2} - \frac{\alpha_{31}}{k_3} \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{1}{k_3} - \frac{1}{k_1} \right) \left(K^* - \frac{2}{3} G^* \right) \alpha + \frac{2}{\alpha} G^* \left(\frac{\alpha_{31}}{k_3} - \frac{1}{k_1} \right) \right]^2 \right\}^{0.5}$$

$$\alpha = 1 + \alpha_{21} + \alpha_{31};$$

$$\beta = \sqrt{(1 - \alpha_{21})^2 + (\alpha_{21} - \alpha_{31})^2 + (\alpha_{31} - 1)^2};$$

$$\varepsilon = \frac{\alpha \Gamma}{\beta \cdot \text{Sign}(\varepsilon_1)} \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad \alpha_{21} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}; \quad \alpha_{31} = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}.$$

В соответствии с формулами перехода от истинных напряжений к обобщённым коэффициенты k_i равны:

$$k_i = \sqrt{\frac{(1 + 2\varepsilon_j^*)(1 + 2\varepsilon_k^*)}{(1 + 2\varepsilon_i^*)}}, \quad i, j, k = 1, 2, 3 - \text{ круговая перестановка индексов.}$$

В качестве независимой переменной принята деформация, т.е. для одного и того же значения деформации $\varepsilon = \varepsilon^*$ и $\Gamma = \Gamma^*$ вычислялись значения σ и τ как по уравнениям (2), так и по уравнениям (4). Перемещения в этом случае, естественно, будут разными.

Исходные данные: $R_c = 20$ МПа; $R_p = 2$ МПа; $K_0 = 1,4 \cdot 10^4$ МПа; $G_0 = 1,2 \cdot 10^4$ МПа; $\Gamma_c = 0,583 \cdot 10^{-3}$; $q = 300$.

На рис.1 и 2 сплошные линии соответствуют геометрически нелинейной модели бетона, пунктирные – геометрически линейной модели бетона, причём кривым 1,1*; 2,2*; 3,3*; 4,4*; 5,5*; 6,6*; 7,7* соответствуют значения коэффициента α_{12} равные 0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2.

В табл.1 представлены данные по взаимному отклонению кривых $\sigma = 3K\varepsilon$ и $\sigma^* = 3K^*\varepsilon^*$, а также кривых $T = G\Gamma$ и $T^* = G^*\Gamma^*$ для различных случаев деформированного состояния.

На основании численных экспериментов и исследования поведения кривых объёмного (рис.1а,2а) и сдвигового (рис.1б,2б) деформирования получаем следующие выводы:

1. Геометрическая нелинейность практически не сказывается на объёмных деформациях.

2. Геометрическая нелинейность существенно влияет на поведение кривых сдвигового деформирования, причём чем более деформированное состояние отличается от одноосного (кривые 1,1*), тем наблюдается большее расхождение между кривыми, соответствующими линейной и нелинейной моделям бетона.

3. Геометрическая нелинейность приводит, вообще говоря, к снижению величины интенсивности касательных напряжений по сравнению с её значением для геометрически линейной модели бетона.

4. Влияние геометрической нелинейности существенным образом зависит от вида деформированного состояния в рассматриваемой точке бетонного образца.

Таблица 1

Вид деформированного состояния	Среднеквадратичное отклонение		Отклонение в % для $\Gamma = \Gamma_s$	
	$\frac{\sigma}{K_0 \Gamma_c}$	$\frac{\Gamma}{\Gamma_c}$	$\frac{\sigma}{K_0 \Gamma_c}$	$\frac{\Gamma}{\Gamma_c}$
Одноосное сжатие $\Gamma_s = 0,1117 \cdot 10^{-2}$ $\varepsilon_s = 0,0645 \cdot 10^{-2}$	0,2057 · 10 ⁻³	0,3385 · 10 ⁻³	0,0089	0,0531
Одноосное растяжение $\Gamma_s = 0,1518 \cdot 10^{-3}$ $\varepsilon_s = 0,0876 \cdot 10^{-3}$	0,3279 · 10 ⁻⁵	0,9529 · 10 ⁻⁵	0,0020	0,0139
Двухосное сжатие $\Gamma_s = 0,2014 \cdot 10^{-2}$ $\varepsilon_s = 0,2326 \cdot 10^{-2}$	0,0053	0,6870	0,0575	49,9742
Двухосное растяжение $\Gamma_s = 0,8413 \cdot 10^{-4}$ $\varepsilon_s = 0,9713 \cdot 10^{-4}$	0,0000	0,0264	0,0017	49,9949

5. Влияние геометрической нелинейности существенным образом зависит от механических констант бетона.

В деформационной теории пластичности бетона условие предельного равновесия достигается тогда, когда интенсивность деформаций сдвига Γ достигает своего предельного значения Γ_s [1]. В этом случае для первого из соотношений (1) получаем:

$T = \frac{G_0 \Gamma_s}{2} = \frac{G_0 \Gamma_c}{2} k_\lambda = T_c k_\lambda$. Отсюда, после несложных преобразований, следует условие прочности бетона: $T^2 = T_c(T_c + \lambda T)$, или

$$T^2 + \frac{1}{3} f \sigma T_c = T_c^2. \quad (5)$$

Геометрически нелинейным аналогом условия прочности бетона (5) будет, очевидно, соотношение

$$T'^2 + \frac{1}{3} f \sigma' T_c = T_c^2. \quad (6)$$

В развёрнутом виде соотношения (5) и (6) в терминах истинных напряжений имеют, соответственно, вид:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_2 \sigma_3 - \sigma_3 \sigma_1 + f T_c (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 3 T_c^2; \quad (7)$$

$$k_1^2 \sigma_1^2 + k_2^2 \sigma_2^2 + k_3^2 \sigma_3^2 - k_1 k_2 \sigma_1 \sigma_2 - k_2 k_3 \sigma_2 \sigma_3 - k_3 k_1 \sigma_3 \sigma_1 + f T_c (k_1 \sigma_1 + k_2 \sigma_2 + k_3 \sigma_3) = 3 T_c^2. \quad (8)$$

Таким образом, предельное соотношение для случая геометрически нелинейной модели содержит только компоненты тензора обобщённых напряжений, если записывать его в терминах обобщённых напряжений. Если же записывать его в терминах истинных напряжений, то оно содержит как компоненты истинных напряжений, так и компоненты тензора деформаций, входящие в коэффициенты при напряжениях. Следовательно, положение предельной поверхности в системе координат, определяемой главными истинными напряжениями, зависит как от напряжённого, так и от деформированного состояния в точке.

Уравнение (7) описывает поверхность – эллиптический параболоид вращения, главная ось которого совпадает с биссектрисой первого и седьмого октантов. Вершина параболоида имеет координаты: $\sigma_1 = \frac{1}{f}$; $\sigma_2 = \frac{1}{f}$; $\sigma_3 = \frac{1}{f}$ и удалена от девиаторной плоскости, проходящей через

начало координат, на расстояние $z = \frac{\sqrt{3}}{f}$.

Уравнение (8) также описывает поверхность в виде эллиптического параболоида, ось которого имеет направ-

ляющие косинусы: $l_1 = \frac{k_2 k_3}{\vartheta}$; $l_2 = \frac{k_3 k_1}{\vartheta}$; $l_3 = \frac{k_1 k_2}{\vartheta}$;

где $\vartheta = \sqrt{k_1^2 k_2^3 + k_2^2 k_3^2 + k_3^2 k_1^2}$. Вершина параболоида удалена от девиаторной плоскости, проходящей через начало координат, на расстояние

$z = -\frac{\sqrt{3}}{2k} \left(f k_{cp} - \sqrt{f^2 k_{cp}^2 + 12 \bar{k}} \right)$. Здесь $k_{cp} = k_1 + k_2 + k_3$,

$\bar{k} = k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 - k_1 k_2 - k_2 k_3 - k_3 k_1$.

Исследование соотношений (7) и (8) показывает, что в целом форма предельной поверхности в случае геометрической нелинейности определяется напряжённым состоянием, в то время как деформированное состояние определяет смещение и искажение предельной поверхности по отношению к её положению для случая геометрической линейности. Смещение и искажение предельной поверхности зависит как от вида деформированного состояния и уровня развития деформаций, так и от значения физических констант. При этом,

Таблица 2

Вид деформированного состояния	Направляющие косинусы оси эллиптического параболоида			Расстояние от начала координат до вершины параболоида
	l_1	l_2	l_3	
Одноосное сжатие	0,5754	0,5783	0,5783	0,3526
Одноосное растяжение	0,5793	0,5764	0,5764	0,3502
Двухосное сжатие	0,5773	0,5744	0,5803	0,3531
Двухосное растяжение	0,5773	0,5802	0,5744	0,3496

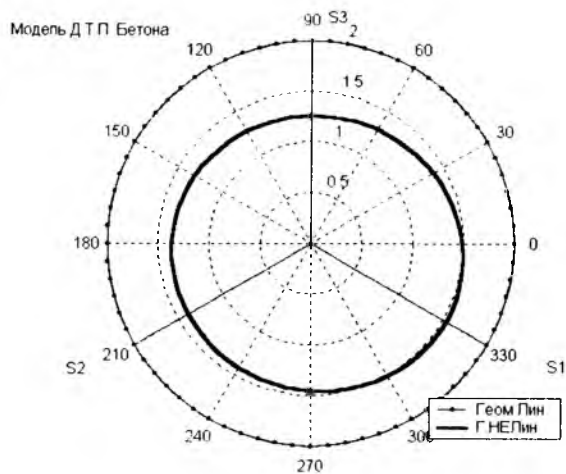


Рис. 3. Девиаторные сечения предельной поверхности

чем выше степень развития геометрической нелинейности, тем более форма предельной поверхности отличается от поверхности вращения.

В табл.2 представлены направляющие косинусы осей эллиптических параболоидов, построенных с учётом геометрической нелинейности, для различных случаев деформированного состояния

($\Gamma_c = 0.583 \cdot 10^{-2}$). Для геометрически линейной модели бетона $l_1 = l_2 = l_3 = 0.5774$, $z = 0.3514$.

На рис.3 представлены девиаторные сечения предельной поверхности, построенной для случая неравномерного деформированного состояния: $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$, $\varepsilon_3 = -2\varepsilon_1$, $\varepsilon_1 > 0$. Исходные данные: $R_c = 20$ МПа, $R_p = 2$ МПа, $\Gamma_c = 0,583 \cdot 10^{-1}$. Сплошные линии соответствуют геометрически нелинейной, а линии с точками – геометрически линейной модели бетона.

Предложенный в статье геометрически нелинейный вариант деформационной теории пластичности бетона позволит решать задачи расчёта бетонных и, вообще говоря, железобетонных строительных конструкций на основе нелинейных соотношений теории упругости В.В.Новожилова.

Библиографический список

1. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М., 1974. –370с.
2. Бакушев С.В. Вариант построения расчётных моделей геометрически нелинейных сплошных сред // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1991. - №9. - С.24-29.
3. Новожилов В.В. Теория упругости. Судпромгиз.- 1958. – 370с.
4. Бакушев С.В. К вопросу о замыкающих уравнениях в геометрически-нелинейной механике // Изв. вузов. Строительство. – 1997. - №5 –С.17-20.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

А.М. ПОДВАЛЬНЫЙ, д-р техн. наук (НИИЖБ)

О классификации видов коррозии бетона

Классификация является важным первичным приемом или методом модельного исследования [1]. Бесспорной научной заслугой профессора В.М. Москвина является то, что он впервые предложил научную классификацию коррозионных воздействий и повреждений бетона, выделив во всем их многообразии 3 главных вида. В качестве основания или критерия классификации был выбран характер повреждения, которое в бетоне, как в существенно пористой структуре, может происходить тремя основными путями (или характеризоваться основными признаками):

а) в результате потери бетоном массы при выносе из него растворимых соединений (коррозия 1 вида);

б) перерождением бетона при химическом взаимодействии компонентов его структуры с агентами среды (коррозия 2 вида);

в) вследствие образования в порах бетона расширяющихся комплексов (в частности, кристаллов слаборастворимых солей), приводящих к внутрипоровому давлению и напряжениям в структуре, превышающим ее прочность (коррозия 3 вида) [2].

К сожалению, процессы кор-

розионного разрушения бетона, как гетеропористой, гетерогенной, многокомпонентной коагуляционно-кристаллизационной структуры так сложны и многостадийны, а агрессивные природные и техногенные воздействия так многообразны, что в целом ряде случаев коррозии бетона наблюдается пересечение или наложение указанных основных процессов или признаков, что делает классификацию не вполне строгой [1]. Однако во всех этих смешанных случаях можно выделить ведущий, лидирующий процесс, непосредственно приводящий к разрушению, т.е. к потере

материалом прочности, сплошности, повышению проницаемости и т.п. Именно таким образом трактовал предложенную классификацию В.М.Москвин.

Коррозия 1 и 2 видов имеет химическую природу, и представление об общем механизме этих видов коррозии было в дальнейшем развито проф. В.Б. Ратиновым и Ф.М. Ивановым [3], использовавшими для их модельного описания теорию гетерогенных химических реакций [4]. Коррозия 3 вида, к которой В.М. Москвин относил действие сульфатных сред и образование в порах бетона малорастворимых сульфатных соединений, имеет как бы смешанный характер. Она начинается в результате химических превращений, но затем, при образовании в порах бетона (цементного камня) кристаллогидратов гипса и гидросульфата алюмината, последние оказывают возрастающее кристаллизационное давление на "стенки" пор, и непосредственное их разрушение приобретает механический, силовой, т.е. физический характер [5].

В том виде, в котором классификация В.М. Москвина трактуется и обсуждается вплоть до настоящего времени [6], она не удовлетворяет важному требованию полноты классификации [1], поскольку за ее пределами оказывается большое число коррозионных воздействий на бетон, например, таких как т.н. "внутренняя" коррозия бетона [7], к которой относят разрушение бетона при взаимодействии щелочей цемента с активным кремнеземом заполнителя, морозное разрушение, разрушение при капиллярном подсосе, повреждение бетона при контакте с органическими средами и др. Это заставляет вводить частные определения и классификации и строить их на различных, в том числе внешних основаниях, например, по типам агрессивных сред или воздействий (магнезиальная коррозия, морозно-солевая агрессия, морская коррозия и др.) [6]. В то же время классификация В.М. Москвина, содержащая, как можно предположить, исчерпывающий перечень характерных видов коррозионного разрушения бетона, предоставляет возможности для существенного рас-

ширения круга коррозионных воздействий, на которые она может распространяться.

Проанализируем случай коррозии 3 вида, традиционное изложение механизма которого, как представляется, страдает определенной незавершенностью. Обычно описание коррозии 3 вида заканчивается утверждением, что кристаллический сросток, образующийся в порах бетона, оказывает давление на мешающий его росту кристаллический каркас цементного камня, который в результате этого давления разрушается. Однако никакие детали этого разрушения, факторы, на него влияющие и т.п., не обсуждаются и не анализируются, поскольку интуитивно как бы совершенно ясно, что если оказывать давление на такую структуру изнутри, то при достаточной величине этого давления она неизбежно будет разрушаться.

В то же время анализ показывает, что механизм этого разрушения не тривиален.

В соответствии с общими принципами системного анализа будем рассматривать бетон и происходящий в нем коррозионный процесс как единую систему и выявим в этой системе ее структуру, иерархию компонентов этой структуры, их взаимодействие друг с другом и затем, на основе результатов такого анализа, проанализируем поведение бетона как целостной системы [1].

В качестве смыслового оправдания последующего анализа обратим внимание на то, что еще до того, как в структуре бетона в результате внутрипорового положительного давления возникнут напряжения, превышающие ее прочность, структура будет испытывать собственные деформации расширения. Способность бетона к значительным деформациям расширения была выявлена во многих экспериментах и, в частности, при исследовании поведения бетона "в обойме". В течение длительного времени не обращалось необходимого внимания на то обстоятельство, что в изотермических условиях при коррозионном расширении (равно, как и при усадке) бетона свободные деформации испытывают не все компоненты его структуры. Очевидно, что причиной де-

формаций всего бетона прежде всего являются пористые компоненты, в неплотностях, порах и капиллярах которых находится жидкая фаза - вода или солевой раствор.

Уточняя далее, заметим, что речь, собственно, следует вести не обо всех пористых компонентах, не о бетоне, цементно-песчаном растворе или цементном камне, а только о гидратированной массе – продукте твердения портландцементного клинкера, по существу, единственном пористом компоненте обычного бетона, занимающем, как правило, не более 10% его объема (рис. 1).

Плотные, беспористые компоненты (в обычном, тяжелом бетоне) – клинкерные реликты, песок и щебень при изотермических коррозионных воздействиях не только не претерпевают такие деформации и не способствуют им, но, наоборот, за счет сцепления по контакту сдерживают их и им препятствуют. В ряде случаев препятствуют весьма активно, как например при морозном воздействии, когда плотные компоненты при охлаждении испытывают свободные температурные деформации противоположного знака по отношению к деформациям гидратированной массы, насыщенной переходящей в лед водой, или при коррозии бетона в жарком сухом климате, когда гидратированная масса испытывает усадочное сокращение в результате потери воды, а плотные компоненты – температурное расширение при нагреве. Поскольку расстояние между плотными компонентами в бетоне весьма мало (так, расстояние между зернами клинкерных реликтов имеет порядок десятых и сотых долей мм), то напряжения, которые возникают в структуре при коррозии, – это не напряжения в "стенках" пор, а скорее напряжения на контакте различно деформирующихся (или деформирующихся и недеформирующихся) компонентов структуры. При этом, в зависимости от направления (знака) деформаций различных компонентов растягивающими, т.е. приводящими к появлению трещин в структуре, могут оказаться как радиальные σ_r , так и тангенциальные σ_t напряжения на контакте раз-



Рис.1. Схема развития процессов коррозии 3 вида в бетонном конгломерате

лично деформирующихся компонентов (рис. 2). Будем в дальнейшем называть эти напряжения структурными.

На рис.1 изображено графическое модельное представление о ситуации, возникающей в бетоне при коррозии 3 вида. В схему включены все основные компоненты бетона, она отражает иерархический характер структуры, и на ней пока-

зано также взаимодействие компонентов структуры бетона, т.е. удовлетворены формальные требования системного анализа [1]. В соответствии с традиционным представлением о бетоне, в нем выделены 3 структурных уровня: цементный камень, цементно-песчаный раствор и собственно бетон. В рассматриваемом плане все уровни построены аналогично: они двух-

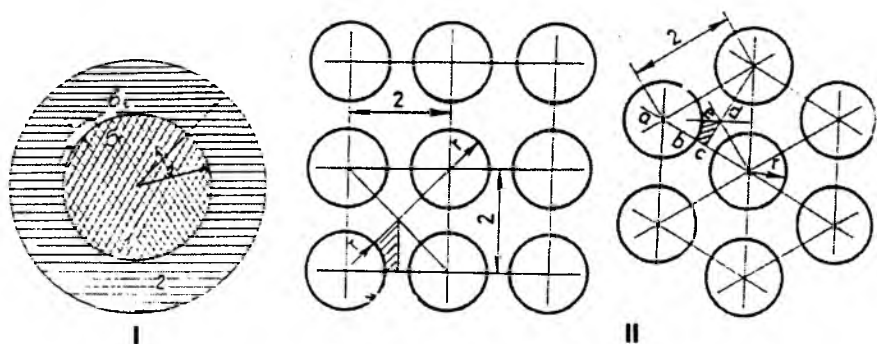


Рис.2. Расчетные двухкомпонентные модели структурных напряжений в бетонном конгломерате на различных структурных уровнях

I — Одиночные модели: плоская модель: 1 — круглый диск, 2 — кольцевая оболочка; трехмерная модель: 1 — шаровое ядро, 2 — сферическая оболочка; II — Континуальные плоские модели: 1 — с ортогональным регулярным расположением круглых включений (заштрихованная область — элементарная расчетная ячейка в матрице); 2 — с треугольным (гексагональным) регулярным расположением включений (abcde — элементарная расчетная ячейка)

компонентны и состоят из плотного и пористого компонентов. Последнее обстоятельство существенно, поскольку позволяет проводить расчет напряжений, возникающих в бетоне при коррозии, на одной и той же структурной модели.

Определенную сложность представляет оценка свободных деформаций пористых компонентов на всех структурных уровнях. Она получается расчетным путем, если известны деформации бетона в результате (или в процессе) коррозионного воздействия. Такую возможность дает схема, изображенная на рис.1, которая построена таким образом, что система более низкого уровня является компонентом уровня более высокого.

Так, например, цементный камень является системой на 2-м уровне, но на 3-м уровне он является компонентом и т.п. Бетон, таким образом, представляет собой как бы вложенные друг в друга структуры, что позволяет охарактеризовать его как специфический материал типа "конгломерат в конгломерате". Такая особенность строения бетона дает возможность расчетным путем вычислить не определяемые экспериментально собственные деформации пористых компонентов на любом структурном уровне, если на каком-то одном, крайнем уровне они известны или получены из опыта. Как правило, экспериментальное определение деформаций осуществляется на бетонных или растворных образцах — призмах и в ряде случаев включено в стандартные методики. Соответствующая аналитическая зависимость, основанная на т.н. "правиле смеси", записывается в следующем виде:

$$\varepsilon_k = \frac{\varepsilon_1 V_1 + \varepsilon_2 V_2}{V_1 + V_2}, \quad (1)$$

где ε_k , ε_1 и ε_2 — относительные деформации двухкомпонентной системы (конгломерата), а также свободные деформации матрицы (пористого компонента) и включений (плотного компонента) на каком-либо структурном уровне, соответственно; V_1 и V_2 — объемные концентрации компонентов.

Поскольку $V_1 + V_2 = 1$, зависимость (1) превращается в особенно простое уравнение с одним не-

известным. Так, если ϵ_k (деформации бетона) определены экспериментально, V_1 и V_2 - известны из состава бетона, а ϵ_2 - например, к.т.р. гранитного заполнителя – справочные данные, то ϵ_1 (деформации цементно-песчаного раствора) определяется из (1) и затем превращается в ϵ_k для компонентов соседнего, нижележащего уровня и т.д. Таким образом определяются все параметры, необходимые для расчета структурных напряжений на всех уровнях структуры бетона. Расчеты свидетельствуют о том, что деформации затухают при переходе от 1 уровня к 4-му [8]. Заметим, что сравнение зависимости (1) с аналогичной по построению зависимостью, в которую включены модули упругости компонентов, показало, что более простая зависимость (1) дает адекватное описание экспериментальных результатов.

Знание свободных деформаций всех пористых и плотных компонентов позволяет осуществить модельный расчет структурных, самоуравновешенных напряжений, возникающих в бетоне. Вследствие наложения напряжений, формирующихся вокруг зерен заполнителей и клинкера различного размера и формы, случайно расположенных в объеме бетонного конгломерата, реальное, фактическое поле напряжений оказывается очень сложным. Задача заключается в том, чтобы найти достаточно простую, поддающуюся расчету физически оправданную модель структуры, которая позволила бы получать результаты, соответствующие экспериментальным данным.

Расчет растягивающих структурных напряжений, вызывающих образование микротрещин и трещин, является ключевым моментом при анализе рассматриваемого случая, т.к. именно трещины являются характерным признаком повреждения бетона при коррозии 3 вида.

На рис.2 представлены расчетные модели для оценки структурных напряжений [9]. Необходимые для расчета средние значения размеров компонентов модели (например, радиуса ядра и толщины оболочки) определяются на основе информации о составе бетона; модули упругости, удельные темпера-

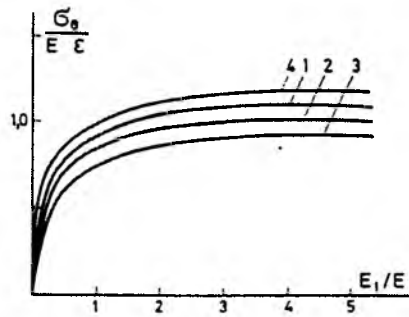


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений σ_0 от отношения модулей упругости включений (E_1) и матрицы (E) при концентрации включений в моделях $\gamma = 0,54$

1 – в модели диск в кольце; 2 – в модели шар в оболочке; 3, 4 – в континуальной модели с ортогональным и треугольным расположением включений, соответственно

турные деформации (к.т.р.) и коэффициенты Пуассона плотных компонентов – справочные данные.

Отметим любопытный экспериментальный факт. Расчеты показали, что как плоская и пространственная одиночные модели – диск с кольцом и шар с оболочкой, так и многосвязные плоские континуальные модели – ортогональная и гексагональная приводят к аналогичным качественным и весьма близким количественным результатам [8]. На рис. 3 в качестве примера представлена зависимость тангенциальных растягивающих напряжений в моделях от отношения модулей упругости включения и матрицы, важнейшего параметра, существенно влияющего на долговечность бетона при коррозии 3 вида и, в частности, на его морозостойкость.

Таким образом, можно заключить, что все представленные на рис. 2 четыре модели, несмотря на казалось бы существенные формальные различия, отражают средние, устойчивые свойства бетонного конгломерата.

В результате наложения полей напряжений, возникающих на каждом уровне, формируются суммарные максимальные растягивающие напряжения в структуре бетона σ_Σ , прежде всего ответственные за появление трещин – характерного признака коррозии 3 вида.

Исследования показали, что возможна следующая простая оценка максимальных суммарных структурных напряжений, возникающих в неоднородной структуре бетонного конгломерата

$$\sigma_\Sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – максимальные структурные напряжения на соответствующих уровнях.

Таким образом, после модельного членения бетона с целью анализа возникающих в нем локальных явлений осуществляется их объединение, необходимое для описания поведения бетона как целостной системы.

Стойкость бетона при коррозии 3 вида определяется безразмерным критерием

$$K = \frac{\sigma_\Sigma}{R_r} = 1, \quad (3)$$

где R_r – прочность при растяжении гидратированной массы, аналог прочности в точке.

Очевидно, что чем меньше значение K , тем выше стойкость материала.

Выполненный выше анализ образования напряженного состояния бетона при коррозии 3 вида обладает достаточно большой общностью и практически не зависит от конкретного вида коррозионного воздействия, приводящего в качестве побудительной причины явления к появлению внутрисферического давления. Естественно, интенсивность разрушения при коррозии зависит от скорости нарастания давления, его значения, возможности его релаксации в структуре и т.п., но сама схема процесса непосредственного разрушения материала неспецифична и приложима к большому кругу коррозионных воздействий. Она не зависит и от того, кристаллической, аморфной или жидкой фазой вызывается давление в структуре.

Кроме сульфатной коррозии, традиционно относимой к 3-му виду, сюда же относится морозное разрушение бетона, насыщенного водой или растворами солей, коррозия бетона в результате взаимо-

действия щелочей в цементе с кремнеземом заполнителя и с доломитизированным известняком, коррозия в результате капиллярного подсоса грунтовых минерализованных вод, коррозия во многих органических средах и др.

Собственные, структурные напряжения, возникающие в бетоне при рассматриваемых воздействиях, естественно, падают в результате их релаксации вследствие ползучести. Однако специфические условия, в которых реализуется ползучесть в рассматриваемом случае – переменное температурное поле, особенно при морозном воздействии, неоднородное и переменное поле напряжений, тонкие, переменной толщины прослойки деформирующегося пористого компонента (см. рис.2), наличие близкорасположенных поверхностей включений, с которыми матрица связана по поверхности контакта, наличие в порах матрицы кристаллов новообразований (льда и кристаллов солей) и т.п. и полное отсутствие экспериментальных данных о ползучести пористых компонентов на различных структурных уровнях при указанных выше осложняющих обстоятельствах делают на настоящем этапе исследований точный количественный учет ползучести чисто формальной, лишённой практического смысла и значения операцией. В принципе, наиболее простым образом ползу-

честь может быть учтена введением коэффициентов релаксации напряжений.

Изложенная выше теоретическая схема была подтверждена большей совокупностью экспериментальных данных (более 60), относящихся к морозостойкости бетона и стойкости его при нагреве и охлаждении [10] и позволила получить в рамках упругого расчета их качественную и количественную корректную трактовку с единой точки зрения. Она позволяет включить в теоретическое рассмотрение коррозионных процессов не только цементный камень, а по существу всю структуру бетона, в том числе и заполнители, влияние которых отмечалось в экспериментах (например, высокая морозостойкость керамзитобетона), но не включалось в теоретическое рассмотрение.

Морозное воздействие – наиболее интенсивный коррозионный фактор [8, 10], и этот вид коррозии бетона 3 вида имеет, по-видимому, наибольшее распространение, особенно в северных странах. По морозному разрушению накоплен самый большой массив экспериментальных данных, отражающих, в частности, влияние на стойкость бетона заполнителей – их концентрации, размеров, модуля упругости и формы. Объединение различных коррозионных воздействий в понятие коррозии 3 вида позволяет надеяться на то, что это объе-

динение будет иметь и эвристическое значение, позволяя осуществлять перенос принципиальных результатов, получаемых при исследовании различных, отдельных конкретных случаев коррозии бетона 3 вида, на другие ее случаи.

Библиографический список

1. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М., Высшая школа, 1989, 367 с.
2. Москвин В.М. Коррозия бетона. М., 1952, 342 с.
3. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве. М., Стройиздат, 1977, 220 с.
4. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. М., 1972, 554 с.
5. Бабушкин В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона. М., Стройиздат, 1968, 192 с.
6. Долговечность строительных конструкций. Материалы международной конференции. М., 2002, 376 с.
7. Рояк Г.С. Внутренняя коррозия бетона. ЦНИИС, 2002, 156 с.
8. Подвальный А.М. Физико-химическая механика – основа научных представлений о коррозии бетона и железобетона. / Бетон и железобетон - № 5. - 2002. – с. 23-27.
9. Осетинский Ю.В., Подвальный А.М. О выборе модели для расчета собственных напряжений в бетоне. / Механика композитных материалов. - № 5. - 1982. – с. 789-796.
10. Подвальный А.М. Элементы теории стойкости бетона и железобетонных изделий при физических воздействиях среды. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 1985, 41 с.

В АНО «Секция «Строительство» Российской инженерной академии» можно приобрести книгу:

«Системные подходы к определению цен и управление стоимостью в строительстве». Справочное пособие с методиками и примерами расчетов. Авторы: академик РИА и МАИЭС, д.т.н., проф. Резниченко В.С. и инженер-экономист Ленинцев Н.Н.

В книге изложены:

- ♦ проблемы ценообразования в строительном комплексе Российской Федерации;
- ♦ организационно-экономические направления снижения стоимости строительства;
- ♦ зарубежный опыт ценообразования в строительстве;
- ♦ порядок разработки сметной документации в современных экономических условиях;
- ♦ содержание и пути совершенствования сметной нормативной базы;
- ♦ методика прогнозной оценки стоимости строительства в текущих ценах;

♦ методики формирования смет с применением ресурсного, ресурсно-индексного и ресурсно-ранжирного методов;

- ♦ рекомендации по совершенствованию оценки стоимости материальных ресурсов;
- ♦ рекомендации по совершенствованию оценки стоимости эксплуатации строительных машин и механизмов;
- ♦ рекомендации по совершенствованию методов оценки оплаты труда рабочих;
- ♦ рекомендации по оценке затрат на содержание службы заказчика;
- ♦ программные комплексы по оценке стоимости строительства.

Объем книги – 465 стр., книга издана ограниченным тиражом.

**Контактные телефоны: (095) 174-75-67,
174-75-80, 171-43-74**

Ю.С.ВОЛКОВ, канд. техн. наук (НИИЖБ)

Евростандарт на бетон введен в действие

Одним из элементов процесса объединения развитых европейских стран в Европейский Союз является, помимо введения единого визового пространства, единой валюты и др., создание единой (гармонизированной) системы евростандартов, обязательных для применения во всех странах – членах Союза. Прежде всего гармонизации подлежат стандарты на продукцию. Для разработки евростандартов и координации работ в этой области был создан Европейский комитет по стандартизации – CEN в составе многочисленных технических комитетов.

В CEN по бетону и железобетону имеются следующие технические комитеты: TC 51 – Цементы, TC 104 – Бетон и составляющие его материалы, TC 154 – Заполнители для бетона, TC 229 – Сборные железобетонные изделия и конструкции, TC-250 – Расчет и проектирование и др.

Стандарт EN 206-1 «Бетон – Общие технические требования, производство и контроль качества» разработан техническим комитетом TC 104. Для учета в стандарте отдельных проблемных положений комитет в своем составе имеет ряд рабочих групп (Task Group – TG), в том числе по долговечности, учету воздействия сред эксплуатации, минеральным добавкам, тепловой обработке, методам испытаний, щелочной реакции заполнителей и др.

Стандарт EN 206-1 «Бетон – Общие технические требования, производство и контроль качества» был утвержден 12 мая 2000 г. Члены CEN по положению обязаны создать условия для применения в своих странах стандартов CEN как национальных стандартов. Ряд стран уже принял этот стандарт, в том числе Финляндия, Франция,

Германия, Италия, Великобритания и некоторые другие. Процесс принятия этого стандарта остальными странами должен быть завершен до конца 2004 г.

Стандарт EN 206-1 начал применяться в европейских странах с различными климатическими и географическими условиями, различными традициями и опытом строительства. Эти обстоятельства пользователям стандарта следует учитывать. В отдельных случаях главы стандарта содержат разрешение на применение национальных территориальных норм.

Евростандарт EN 206 «Бетоны» содержит требования к бетону, производимому на стройплощадке, на заводах товарного бетона, на заводах сборного железобетона и предназначенным для изготовления монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций, в том числе с предварительным натяжением арматуры.

Стандартом EN 206-1 следует пользоваться совместно со стандартами на исходные материалы и методы их испытаний.

Евростандарт содержит требования по следующим разделам: составляющие бетонной смеси; свойства бетонной смеси и затвердевшего бетона; ограничения по составу; спецификации бетонов; доставка товарного бетона; производственный контроль; критерии соответствия и процедуры оценки и др.

Помимо требований, содержащихся в данном стандарте, в отдельных документах могут быть дополнительно изложены требования к бетонам, предназначенным для строительства особо ответственных объектов, транспортных эстакад, высоких плотин, напорных резервуаров, корпусов реакторов

АЭС, морских платформ, дорог, а также к бетонам, содержащим нестандартные компоненты (волокна, нетрадиционные заполнители и добавки).

Данный стандарт не применим к бетону с пенообразующими добавками и искусственным воздухововлечением, крупнопористому (без мелкого заполнителя), плотностью менее 800 кг/м³ и жаростойкому.

Применение попутных продуктов промышленного производства, рециклированных материалов и т.д. пока регулируется национальными стандартами и в настоящий стандарт не включено.

В стандарте под тяжелым бетоном понимается бетон с плотностью выше 2600 кг/м³, обычный бетон (в отечественной литературе такой бетон неудачно называется почему-то «тяжелым») должен иметь плотность от 2100 до 2600 кг/м³, легкий – 800...2100 кг/м³. К высокопрочным бетонам относятся бетоны класса выше C60. Максимальный класс бетона, указанный в стандарте, для тяжелого – C115, для легкого – C88. В стандарте широко используются два термина: «бетон заданного качества» – бетон, требуемые характеристики которого задаются потребителем, при этом изготовитель бетона несет ответственность за обеспечение этих характеристик, и «бетон заданного состава» – бетон, состав которого назначается потребителем, при этом изготовитель несет ответственность за соблюдение этого состава, но не несет ответственность за обеспечение прочих, в том числе эксплуатационных, характеристик такого бетона.

Стандарт не содержит указаний на какую-то юридическую ответственность, вся ответственность, которая стандартом имеется в виду, – это техническая ответственность.

Стандарт EN 206-1 содержит указания для проектировщика, изготовителя и подрядчика (заказчика) бетона. Проектировщик несет ответственность за правильное назначение требований к бетону (глава 6), изготовитель несет ответственность за выполнение этих требований на стадии производства и контроля, подрядчик несет ответственность за надлежащее выполнение бетонных работ на стройплощадке (главы 8 и 9).

На практике может быть несколько различных организаций, формулирующих требования к бетону, например, владелец объекта, проектировщик, подрядчик, субподрядчик и т.д. Каждый ответствен за грамотное формулирование требований для изготовителя бетона.

В терминах стандарта это называется specification – технические условия, технические требования. Проектировщик, изготовитель и подрядчик могут быть одним лицом (например, компания, которая осуществляет и проектирование, и строительство). Стандарт предусматривает необходимость обмена информацией между различными сторонами.

Треть стандарта по объему посвящена требованиям по обеспечению качества бетона. Детально прописаны правила отбора проб при приготовлении бетона при испытании на прочность, обозначены критерии соответствия, причем не только по показателям прочности, но и по другим характеристикам: плотности, В/Ц, содержанию цемента (недовложение против проекта не более 10 кг/м^3) и т. д. Имеются указания по контролю всех материалов, операций и оборудования, используемых при приготовлении бетона.

Оговорены и меры, которые необходимо принять в случае нарушения тех или иных требований. Заканчивается стандарт описаниями процедур сертификации и аудиторской проверки производства бетона.

Требования к бетону, как это предписывает стандарт, должны назначаться для обеспечения срока надежной эксплуатации конструкции или сооружения в течение не

менее 50 лет. При этом предполагается, что бетон тщательно уложен и уплотнен, обеспечены необходимые условия для набора прочности материала с учетом погодных условий, и сооружение эксплуатируется в той же окружающей среде, для которой были подобраны характеристики бетона.

Стандарт содержит рекомендации по учету воздействия на бетон шести различных сред эксплуатации, и только одна не считается агрессивной. Остальные пять имеют три или четыре подградации по степени увеличения агрессивности, или, если можно так выразиться, суровости эксплуатации. Соответственно, рекомендуемые прочности бетона для этих сред колеблются от C25 (опасность карбонизации) до C45 (морская вода, химическая агрессия). При действии замораживания-оттаивания минимальный класс по прочности на сжатие рекомендуется S30*. Здесь уместно указать, что утвержденный недавно СНиП 52-01-03 (равно как и предыдущий СНиП 2.03.01 «Железобетонные и бетонные конструкции. Основные положения») содержит семь марок по морозостойкости в циклах замораживание-оттаивание для тяжелого (в терминологии EN 206-1 обычного) бетона. EN 206-1 такой классификации по морозостойкости в циклах не приводит, имея в виду, что если бетон проектируется как морозостойкий, для заданной среды эксплуатации, то число циклов не должно иметь какого-либо значения. Иными словами, в EN 206-1 указаны пути обеспечения морозостойкости и водонепроницаемости бетона через выполнение технологических требований, при соблюдении которых в конечном счете обеспечивается долговечность бетона конструкций.

От себя заметим, что исчерпание морозостойкости бетона в результате циклического замораживания – оттаивания, как достижение материалом некоего предельного состояния, является подходом су-

* В стандарте класс бетона обозначен через С, от английского слова concrete – бетон. Наше обозначение В идет от немецких норм – beton.

губо условным, поскольку эти циклы для реальных сооружений никто толком не считал. Не случайно в СНиП 2.01.07 «Нагрузки и воздействия», в разделе 8 «Температурные климатические воздействия» ни о каких циклах нет ни слова.

В процессе разработки стандарта EN 206-1 были рассмотрены возможности включения в него положений, касающихся обеспечения долговечности бетона на базе данных поведения железобетонных конструкций в процессе эксплуатации. Однако комитетом ТС104 было признано, что этот подход пока еще не достаточно разработан, чтобы быть приведенным в стандарте в виде конкретных рекомендаций. В то же время было признано, что в ряде стран имеются значимые достижения в этом направлении в части учета местных условий эксплуатации. Поэтому предполагается продолжение исследований и накопление данных, имея в виду в перспективе обобщение результатов и формулирование рекомендаций на уровне стандарта.

В стандарте имеется 10 приложений, среди которых следует отметить рекомендации по первичным подборам составов, по обеспечению долговечности бетона на стадии приготовления в зависимости от сред эксплуатации, сертификации систем производственного контроля, требования по точности дозирования оборудования и др.

Вошедший в действие с 1 июля 2003 г. Закон РФ «О техническом регулировании» провозгласил приоритеты международных стандартов в области технического регулирования (ст.12) при разработке национальных стандартов. Стандарт EN 206-1 имеет прямое отношение к ряду отечественных СНиП и стандартов на бетон и бетонные смеси, в том числе ГОСТ 26633, ГОСТ 10980 и др. При их пересмотре основные положения евростандарта необходимо будет учесть, а в перспективе принять евростандарт целиком.

В НИИЖБе выполнен перевод текста стандарта EN 206-1 на русский язык, который рассылается по заявкам организаций. Объем стандарта 70 страниц. Справки по тел. 174-76-77.

Бетон и биопозитивное строительство

В США создан и действует Совет по «зеленому», или биопозитивному строительству (USGBC), который оценивает и сертифицирует проекты возводимых зданий и сооружений с точки зрения их воздействия на окружающую среду. Совет рассматривает достоинства и недостатки сооружения, руководствуясь разработанной системой баллов, и на основе консенсуса может присваивать проекту здания сертификат «Лидера в проектировании энергоэкономичных и биопозитивных зданий». Целью Совета является всемерное распространение и ускорение рыночно-ориентированных принципов «зеленого» строительства в повседневной практике. Программа структурирована достаточно гибко, т.е. проект может быть сертифицирован, даже если он не отвечает всем требованиям системы.

Система оценивает пять основных положений проекта: строительная территория; использование воды; энергия и атмосфера; материалы и ресурсы; качество среды внутри помещения. Каждая категория оценивается определенным количеством очков (см. таблицу).

Набранное количество очков определяет уровень выдаваемого сертификата: (26-32) очка – стандартный сертификат; (33-38) очков – серебряный сертификат; (39-51) – золотой и (52-69) – платиновый. Детальная информация по системе

начисления очков за достоинства проекта представлена на веб-странице Совета: www.usgbc.org. Дополнительное количество очков может быть начислено за применение инноваций в проекте (до 5).

В случае применения в проекте цемента, бетона и конструкций из бетона при оценке по всем категориям возможно набрать максимум 21 очко. Так, например, по первому разделу «Строительная территория» возможно набрать до 3 очков при использовании цемента для закрепления и стабилизации загрязнённых грунтов на территории строительства, для предупреждения загрязнения водных источников за счёт организации стока ливневых потоков и применения так называемого пористого бетона для тротуарных покрытий для свободного проникновения дождевой воды в грунт.

По разделу «Энергия и атмосфера» представляется возможность набрать от 2 до 10 очков. При использовании в здании элементов из монолитного или сборного бетона, особенно лёгкого бетона, здание приобретает свойства массивного или энергоаккумулирующего сооружения, которое может эффективно сглаживать температурные пики, по сравнению с немассивными зданиями из других материалов, хотя имеющих такое же сопротивление теплопередаче. В случае массивных зданий представляется возможность экономии энергии на искусственное кондиционирование здания при максимальном обеспечении естественной вентиляции, что, кроме того, создаёт более здоровый климат внутри помещения и уменьшает количество вредных выбросов в атмосферу. Начисление очков идет за экономией энергии от 15 до 60% в новых зданиях и от 5 до 50% в существующих.

По разделу «Материалы и ресурсы» можно получить до 8 очков при использовании всех возможно-

стей. Так, например, при реконструкции здания в случае сохранения и использования от 75 до 100% наружных стен (а это возможно в зданиях с ограждающими конструкциями из бетона благодаря долговечности материала) дают 2 очка. При сносе и разрушении зданий до 2 очков можно заработать при использовании 50% и более строительного мусора, грунта и особенно бетона при планировке строительного участка или при его сохранении для дальнейшего использования в качестве засыпки или для повторного применения. До 2 очков можно зачислить себе в актив при использовании техногенных отходов вместо стандартных материалов, например при замене цемента золой, микрокремнеземом или шлаком, а также при повторном использовании переработанного бетона в качестве крупного заполнителя для изготовления новой бетонной смеси. Также оценивается применение при строительстве местных или региональных материалов, в частности песка, щебня, сборного железобетона и арматурной стали, причем внимание уделяется также расстоянию от места поставки до стройплощадки: чем оно меньше, тем выше оценка.

Улучшение качества среды внутри помещения, согласно таблице, может принести до 15 зачетных очков. Это весьма важная категория оценки, заметно влияющая на весь проект в целом. Как уже упоминалось ранее, в массивных или энергоаккумулирующих зданиях за счет повышения комфортности снижается заболеваемость и повышается производительность труда сотрудников, а зарплата штата специалистов во многих странах до 10 раз превышает расходы на аренду помещения.

Дополнительное количество очков за применение инноваций может быть начислено за нестандартные решения в проекте, например за

Оцениваемые положения	Возможное количество очков
Строительная территория	14
Использование воды	5
Энергия и атмосфера	17
Материалы и ресурсы	13
Качество среды внутри помещения	15
Суммарное количество очков	64
Инновации в проекте	5

замещение в бетоне 40% и более цемента шлакопортландцементом или золой, но целесообразность и возможность такой замены должна быть подтверждена экспериментально.

Сертификация Совета по «зеленому», или биопозитивному строительству является добровольной, однако многие города и некоторые штаты не только отдают предпочтение сертифицированным проектам, но и предоставляют кредиты и налоговые льготы тем организациям, которые их используют в строительстве. Правительство США находится в стадии принятия аналогичной программы сертификации для Администрации общих служб, которая владеет свыше 8300 государственных зданий, и для армии США, которая также ведет значительный объем строительства.

Совет по «зеленому» строительству стремительно расширяет

свою деятельность. Если в 1999 г. при нём было зарегистрировано 250 организаций-членов, то в настоящее время их число перевалило за 3500! При этом бюджет Совета в 1999 г. составлял \$ 400 тыс. (половина из которых – членские взносы), то сейчас он достиг \$17 млн, причем только 20% бюджета составляют взносы, а остальная часть – это гранты и взносы за участие в конференциях и других учебных мероприятиях Совета. После начала внедрения системы сертификации в 2000 г. уже более 1000 организаций приняло участие своими проектами в конкурсах, что составило почти 7% от количества всех коммерческих проектов в США.

На состоявшейся 12–14 ноября 2003 г. конференции Совета в г. Питтсбурге присутствовало более 5 тыс. профессионалов – проектировщиков и конструкторов, проявляющих интерес к проблемам устой-

чивого развития и строительства. Из последних значительных проектов, сертифицированных Советом, можно выделить здание конгресс-центра стоимостью \$385 млн, где рециркулируется существенный объем потребляемой воды и широко используется естественная вентиляция и дневной свет при экономии потребляемой энергии около 30%.

Система «зеленого» строительства расширяет объемы экологически благоприятных зданий и сооружений, способствует улучшению окружающего климата и комфорту внутри помещений, ведет к уменьшению отходов как в процессе строительства, так и в процессе эксплуатации зданий. Бетон и конструкции из него отлично вписываются в эту систему.

В.П.Трамбовецкий,
канд. техн. наук (НИИЖБ)

НАМ ПИШУТ

К.В.МИХАЙЛОВ, д-р техн. наук, проф. (НИИЖБ)

Важность единой терминологии в области бетона и железобетона

Непрерывно растущие масштабы применения бетона и конструкций на его основе почти во всех областях мирового строительства требуют создания и внедрения новых видов бетона и арматуры, совершенствования конструкций зданий и сооружений, технологий их производства и обеспечения долговечности.

Естественно, это обстоятельство влияет на применяемую терминологию, которая постоянно расширяется и дополняется новыми понятиями. Так, например, вначале особое внимание уделяли повышению прочности бетона на сжатие, и по-

явился термин «высокопрочный бетон» (high strength concrete), который сменился на термин «высококачественный бетон» (high performance concrete). Учитывая, что современный бетон должен обладать, как правило, несколькими важными свойствами, возникло предложение ввести обобщающий термин «бетон заданных свойств» (defined performance concrete), который в настоящее время обсуждается в научных кругах. Не установлено, что надо понимать под добавками бетона, а что под модификаторами и т.д. Выпущенные в ряде технически развитых стран (США, Англия, Германия и

др.), терминологические словари по бетону и железобетону недостаточны по содержанию и заметно устарели. Назрела необходимость создания полноценного словаря по этой тематике в нашей стране.

Словарь должен быть рассчитан на широкий круг инженерно-технических работников, тесно связанных со строительством. К ним относятся научные сотрудники, преподаватели и аспиранты научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений, инженерно-технические работники проектных и строительных организаций, производственных предприятий строи-

дустрии, сотрудники редакций технических издательств, журналов и газет.

Особенно важен такой словарь при составлении нормативной документации и написании технической литературы (статьи, монографии, проспекты и т.д.).

Словарь должен отображать перспективу расширения применения бетона и железобетона во всех областях капитального строительства. В словаре следует предусмотреть английский эквивалент всех принятых русских терминов, что позволит чаще использовать и правильно понимать содержание важной научно-технической литературы, опубликованной в ряде передовых стран. Для экономии места в словаре следует применить систему сокращений и условных обозначений, перечень которых должен быть приложен.

Естественно, что в словарь надо включить термины, непосредственно связанные с бетоном и железобетоном, часто используемые в технической литературе.

Для облегчения пользования

словарем целесообразно принять следующее его построение.

1. Изложить содержание словаря в табличной форме со следующими параграфами:

номера по порядку в каждом разделе;

термины;

определение терминов;

английские эквиваленты терминов.

2. Разбить словарь на шесть следующих разделов:

бетоны (вяжущие, заполнители, добавки, модификаторы, растворы, бетоны);

арматура (стальная и неметаллическая арматура, изделия арматурные, фибра, машины);

бетонные и железобетонные конструкции (монолитные, сборные, сборно-монолитные, предварительно напряженные, пространственные, специальные);

производство бетонных и железобетонных конструкций, возведение сооружений в различных условиях (опалубка, формы, армирование, бетонирование, ускорение твердения бетона, распалубка, машины);

теория и методы расчета бетонных и железобетонных конструкций (прочность, деформативность, трещиностойкость, предельные состояния, характеристики, коэффициенты);

долговечность бетона и железобетона (коррозия бетона, арматуры и конструкций, морозостойкость, сейсмостойкость, огнестойкость, диагностика, восстановление, усиление).

3. В каждом разделе термины располагать по алфавиту.

4. Каждый термин должен состоять, как правило, не более чем из двух-трех слов; допускаются обоснованные отклонения.

5. Каждый термин надо начинать с основного слова, например, технология конвейерная, технология агрегатно-поточная, технология стендовая и т.д.

6. Определение терминов не должно быть излишне подобным.

Терминологический словарь необходимо рекомендовать для всеобщего применения, для чего его следует включать в Свод правил по бетону и железобетону.

Уважаемые читатели!

С 1 апреля началась подписка на журнал "БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН" на второе полугодие 2004 г.

Сведения о подписке содержатся в Объединенном каталоге (он зеленого цвета) "Пресса России".

Подписной индекс **70050**.

Подписка принимается во всех отделениях связи без ограничений.

Тел. для справок 292-6205, 703-9762.

Редакционная коллегия: Ю.М.Баженов, В.Г.Батраков, В.М.Бондаренко, Ю.С.Волков, В.В.Гранев, В.Г.Довжик, А.И.Звездов, Б.И.Кормилицин, К.В.Михайлов, В.А.Рахманов, И.Ф.Руденко, Р.Л.Серых (главный редактор), А.Г.Тамразян, В.Р.Фаликман, Ю.Г.Хаютин, А.А.Шлыков (зам.главного редактора), Е.Н.Щербаков

Подписано в печать 26.03.04. Формат 60x88^{1/8}. Печать офсетная. Бумага офсетная № 1
Усл.печ.л. 4,0 Заказ № 395

Адрес редакции
Москва, Георгиевский пер., д.1, строение 3, 3-й этаж

E-mail: magbeton@rambler.ru
Тел. 292-6205, 703-9762

Отпечатано в ОАО Московская типография № 9
109033, Москва, Волочаевская ул., д.40



ВИТАМИН ПРОЧНОСТИ

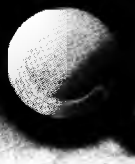


ХИМИЧЕСКИЕ ДОБАВКИ ДЛЯ БЕТОНОВ

Россия, 123001, Москва, Б.Козихинский пер. д.22, офис 61
тел.: (095) 974-6328, 299-2793, факс: 209-0328
E-mail: sales@polyplast-un.ru, WWW: www.polyplast-un.ru

Представительство по Южному региону:
ООО "Полипласт-Юг" 350020, Краснодар, ул.Коммунаров, д.262, литер В
т/ф (8612) 55-46-43, т. 64-08-98 E-mail: polyplast-ug@mail.ru

Представительство по Северо-Западному региону:
ООО "Полипласт Северо-Запад" 193230, Санкт-Петербург, пер. Челиева д. 13
т/ф (812) 446-32-42, т. (812) 446-67-34 E-mail: polyplast-nws@peterlink.ru



ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

ИПС-МГ4

Измерители прочности бетона методом ударного импульса по ГОСТ 22690

Возможность занесения 16 индивидуальных градуировочных зависимостей.

ИПС-МГ4+

Расширенный режим с возможностью учета вида заполнителя, возраста и условия твердения бетона. Более 100 зависимостей, связь с компьютером.

Диапазон измерения прочности.....3...100МПа
 Относительная погрешность.....не более +10%

ПОС-МГ4 «Отрыв»

Измеритель прочности бетона методом отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690

Приборы фиксируют максимальную нагрузку, индицируют скорость нагружения и текущую нагрузку, обеспечивают автоматическую обработку измерений, оснащены энергонезависимой памятью.

ПОС-МГ4 «Скол»

Измеритель прочности бетона методом скалывания ребра и отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690.

Диапазон:
 методом скалывания.....10...70МПа
 методом отрыва.....5...100МПа

**ИЗМЕРИТЕЛИ СИЛЫ НАТЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
 ДО-МГ4 ЗИН-МГ4**

Измеритель силы натяжения арматуры методом поперечной оттяжки по ГОСТ 22362

Диаметр контролируемой арматуры.....3, 4, 5, 6 мм
 Диапазон усилий.....200...4500кГс(1,96...44 кН)

Измеритель напряжений в арматуре железобетонных изделий частотным методом по ГОСТ 2236

Диапазон напряжений 150-1500 МПа в стержневой, проволочной и канатной арматуре диаметром 3-32 мм длиной 3-18 м

ПРИБОРЫ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ИТП-МГ4 «100/250»

Измеритель теплопроводности и термического сопротивления строительных и теплоизоляционных материалов при стационарном режиме по ГОСТ 7076-99 и методом теплового зонда по ГОСТ 30256

Диапазон определения коэффициента теплопроводности.....0,02...1,5 Вт/м·К
 Размеры испытываемого образца.....100x100мм/250x250мм

ИТП-МГ4 «Поток+»

Измеритель тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции зданий и сооружений по ГОСТ 25380

Диапазон измерения плотности тепловых потоков.....2...500 Вт/м²
 диапазон измерения температуры.....-30...+100°С

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

МГ4Д - измеритель влажности древесины по ГОСТ 16 588. Диапазон 4...60%. Семь пород древесины.

МГ4Б - измеритель влажности бетона, кирпича по ГОСТ 21718. Диапазон 1...45%. Более 20 зависимостей.

МГ4У - универсальный измеритель влажности строительных материалов по ГОСТ 21718. Диапазон 1...45%. Более 27 зависимостей.

МГ4В - измеритель температуры и влажности воздуха с возможностью регистрации данных и вывода на компьютер. Диапазон влажности 0...99,9%

ИПА-МГ4

Измеритель защитного слоя бетона, расположения и диаметра арматуры железобетонных конструкций магнитным методом по ГОСТ 22904

Диапазон измерения защитного слоя.....3...100 мм
 при диаметре стержней.....3...40 мм

ПСО-МГ4

Измеритель адгезии предназначен для контроля прочности сцепления керамической плитки, штукатурки, защитных и др. покрытий с основанием методом отрыва стальных дисков (пластин) по ГОСТ 28089, 28574 и др.

Диапазон.....0,1...20 МПа
 Основная погрешность.....не более +2%

ИСП-МГ4 (анемометр)

Измеритель скорости воздушных потоков и их температуры в вентиляционных системах промышленных и гражданских зданий, а также для измерения средней скорости ветра.

Диапазон измерения скорости воздушного потока.....0,3...30 м/с
 Диапазон измерения температуры.....-10...+100°С

Вибротест-МГ4+

Измеритель пиковых значений виброскорости, виброускорения, амплитуды и частоты колебаний виброустановок и других объектов.

Диапазон измерения частоты.....2...1000 Гц
 Диапазон измерения амплитуды.....0,01...100 мм/с

