

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ПРИ МЕСТНОМ СЖАТИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Используемая в действующих нормах проектирования железобетонных конструкций и сохраненная с некоторыми изменениями в проекте норм СНБ методика расчета на местное сжатие, хотя и обеспечивает хорошее соответствие расчетных и экспериментальных величин основана на эмпирическом подходе, т.е. не базируется на какой-либо физической расчетной модели. В то же время анализ результатов экспериментальных исследований свидетельствует о том, что в рамках принятого эмпирического подхода не получило своего объяснения наблюдающееся различие в динамике роста прочности при местном сжатии тяжелого и легкого бетона в зависимости от соотношения площади нагружаемой плоскости образца к площади приложения нагрузки.

В отличие от расчета железобетонных элементов по нормальным сечениям методика расчета норм на местное действие нагрузки позволяет рассчитывать только прочность элементов, но не их деформации. Хотя в действительности расчет нормального сечения можно считать частным случаем расчета при местном действии нагрузки.

Дальнейшее развитие методики расчета конструкций на местное сжатие должно производиться в направлении не только прочностного, но и деформационного расчета. Это возможно только на основе использования физической расчетной модели, позволяющей учитывать геометрические размеры и характеристики структурных составляющих бетона (цементного камня и крупного заполнителя), а также расположение площадки приложения нагрузки по отношению к расположению структурных составляющих бетона.

С учетом многофакторности рассматриваемой задачи расчета представляется целесообразным оценку влияния факторов производить на конечно-элементных моделях, разработанных на основе физической расчетной модели. В связи с этим степень сложности принимаемой физической расчетной модели следует назначать не только исходя из реальной структуры бетона, но и из возможностей существующих пакетов программ конечно-элементного анализа.

Данные экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния бетона при различных видах силовых воздействий свидетельствуют о том, что механизм его трещинообразования, характер развития и раскрытия трещин, а также вид его разрушения многом предопределяются структурой бетона и физико-механическими свойствами компонентов структуры. Ранее было принято [1] укрупненно различать два компонента — матрицу в виде окаменевшего цементно-песчаного раствора (непрерывная компонента) и включения в нее в виде зерен крупного заполнителя (прерывная компонента). В дальнейшем [2] структура бетона была дополнена третьей компонентой — так называемой контактной (транзитной) зоной между матрицей и крупным заполнителем. Причем более поздние исследования показали, что свойства контактной зоны существенно изменяются по ее толщине [3]. Добавление в модель структуры бетона новых компонент приводит к значительному увеличению количества параметров расчетной модели бетона, многие из которых невозможно проконтролировать в процессе изготовления конструкций.

Немаловажным является и вопрос о размерности физической расчетной модели. В большинстве исследований независимо от компонентности рассматриваются двумерные плоскостные модели постоянной толщины [1]. В этом случае заполнитель моделируется либо дисками либо правильными шестигранными призмами. Однако в связи с пространственным характером напряженно-деформированного состояния бетона при местном сжатии не вполне обоснованно использовать в этом случае плоскостную модель.

Изложенные выше обстоятельства обусловили необходимость разработки пространственной (трехмерной) структурно-механической расчетной модели бетона. Такая модель может быть разработана на основе структурно-механической модели цементного теста [4].

Структурно-механическая модель бетона принята трехмерной двухкомпонентной, состоящей из матрицы в виде окаменевшего цементно-песчаного раствора и включений в нее в виде равновеликих шарообразных зерен крупного заполнителя. При этом схема упаковки последних принята регулярной с координационным числом 12, т.е. около каждого из зерен на одинаковом расстоянии от него расположено 12 зерен.

Радиус  $\rho_3$  зерна крупного заполнителя принимается интегрально из условия равенства удельной поверхности зерен модели фактической удельной поверхности крупного заполнителя и определяется по формуле

где  $S_{y3}$  и  $\rho_3$  — соответственно удельная поверхность и плотность крупного заполнителя.

Половина расстояния между зернами крупного заполнителя  $\delta_m$  принимается исходя из состава бетонной смеси, а также свойств ее составляющих, и определяется по формуле

где  $m_{пз}$  — спустотность крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии, а  $G_3$  — расход крупного заполнителя на  $m^3$ .

Тогда расстояние  $l$  между центрами зерен крупного заполнителя определяется по формуле  $l = 2 \cdot (r_3 + \delta_m)$ , а размеры элементарной ячейки модели в направлении осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  пространственной системы координат по формулам  $l_x = l$ ,  $l_y = \sqrt{3} \cdot l / 2$ ,  $l_z = \sqrt{2} \cdot l / \sqrt{3}$ .

Физико-механические свойства крупного заполнителя и матрицы характеризуются модулями деформаций  $E_3$  и  $E_m$ , коэффициентами поперечных деформаций  $\mu_3$  и  $\mu_m$ , либо задаются диаграммами  $\sigma_3 = f(\epsilon_3)$  и  $\sigma_m = f(\epsilon_m)$ .

Напряженно-деформированное состояние элементов структурно-механической модели бетона при осевом сжатии при данном размере зерна крупного заполнителя зависит от относительных параметров  $n_E = E_3 / E_m$  и  $n_\epsilon = \epsilon_3 / \epsilon_m$ , характеризующих соотношения физико-механических характеристик компонентов, а также приведенной полутолщины прослойки между зернами заполнителя  $\beta = \delta_m / r_3$ .

Для случая местного действия нагрузки помимо этих параметров на напряженно-деформированное состояние элементов модели будут влиять относительный структурный параметр  $\gamma = r_{loc} / (r_3 + \delta)$  и относительный размер площади приложения нагрузки  $\varphi = r_{dis} / r_{loc}$ . Первый характеризует соотношение приведенного размера  $r_{loc}$

области приложения местной нагрузки и расстояния между зернами заполнителя, а второй — отношение приведенного размера  $r_{dis}$  области распределения нагрузки и приведенного размера области приложения нагрузки.

На основе перечисленных параметров структурно-механической модели бетона с использованием пакета программ конечно-элементного анализа NASTRAN FOR WINDOWS была разработана конечно-элементная модель, по которой впоследствии выполнялись расчеты при различных условиях приложения силовых воздействий.

Размеры структуры модели определялись по приведенным выше формулам для следующих данных: о составе бетона: пустотность крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии  $m_{пз} = 0,3084$ ; расход крупного заполнителя  $G_3 = 920 \text{ кг/м}^3$ ; удельная поверхность крупного заполнителя  $S_3 = 0,385 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; плотность крупного заполнителя  $\rho_3 = 2600 \text{ кг/м}^3$ .

Тогда радиус  $\rho_3$  зерна крупного заполнителя  $\rho_3$  составил 3 мм, а половина расстояния между зернами крупного заполнителя  $\delta_m = 0,75 \text{ мм}$ .

В качестве примера на рис. 1 приведены (в деформированном состоянии) конечно-элементные модели куба размером  $105,0 \times 105,0 \times 106,6 \text{ мм}$ , который центрально загружен жестким по нижней и верхней плоскости жесткими штампами размерами  $22,5 \times 22,5 \text{ мм}$  (рис. 1а) и  $52,5 \times 52,5 \text{ мм}$  (рис. 1б). На рис. 2. представлены картины распределения напряжений соответственно в матрице и заполнителе.

В силу симметрии приложения нагрузки для уменьшения размерности задачи смоделирована 1/16 часть куба. Смоделированная часть куба получена его разделением тремя плоскостями симметрии. Действие на смоделированную часть куба каждой из 3 примыкающих к ней его частей заменено наложением в плоскостях разреза связей на перемещения в направлении перпендикулярным этим плоскостям. Приложение нагрузки осуществлялось заданием по плоскости приложения жесткого штампа постоянного по его площади перемещения, равного  $0,533 \text{ мм}$ , что соответствует средней относительной деформации бетона в области между штампами равной  $1\text{‰}$ .

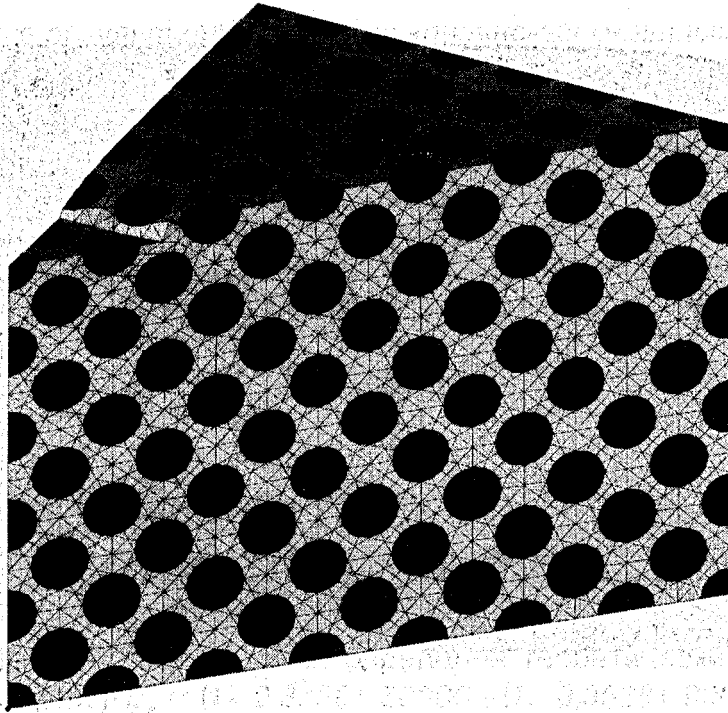
При расчете кроме картин распределения главных сжимающих и растягивающих напряжений определялись величины реакций в связях по нижнему торцу модели и величина их равнодействующей, а также ее положение в системе координат модели.

Следует отметить, что деформирование модели производилось не приложением нагрузки, а путем задания постоянного перемещения узлов верхнего торца модели, расположенных в пределах условного жесткого штампа. Поэтому величина нагрузки, приложенной к модели, заранее известна не была и могла быть получена только в результате расчета. В связи с этим дополнительно производилось определение возникших при деформировании модели усилий в узлах верхнего торца, получивших заданное перемещение. После чего определялась величина их равнодействующей и ее положение в системе координат модели.

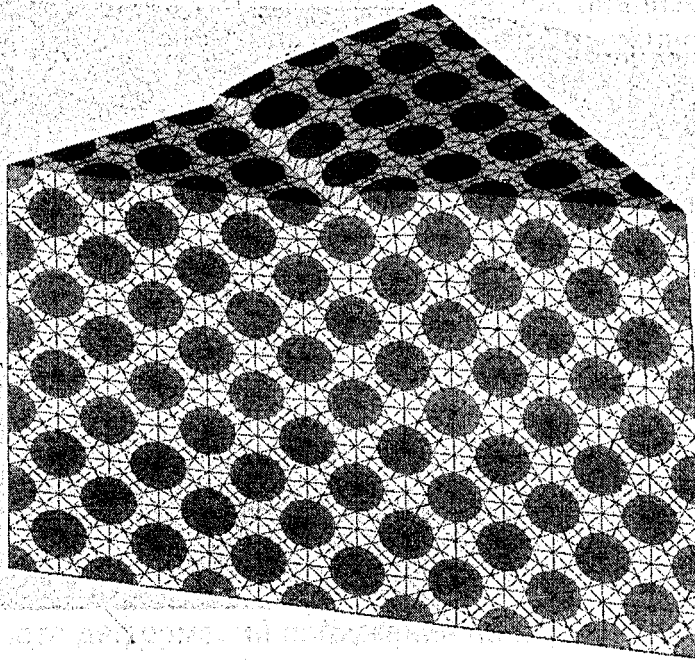
Как показали результаты вычислений величины равнодействующих по нижним и верхним торцам модели одинаковы. Отклонение по горизонтали положения равнодействующей на верхнем торце образца от положения равнодействующей на нижнем увеличивается с уменьшением размера площади нагружения.

Из-за отклонения положений равнодействующей на нижнем и верхнем торцах в образце возникает распорное усилие. Выполненный анализ (таблица) показал, что при одинаковой осадке нагружаемых узлов верхней плоскости максимальный распор имеет место не при первом, а при втором нагружении. А наибольшая величина усилия наблюдается при полном нагружении верхнего торца.

a)



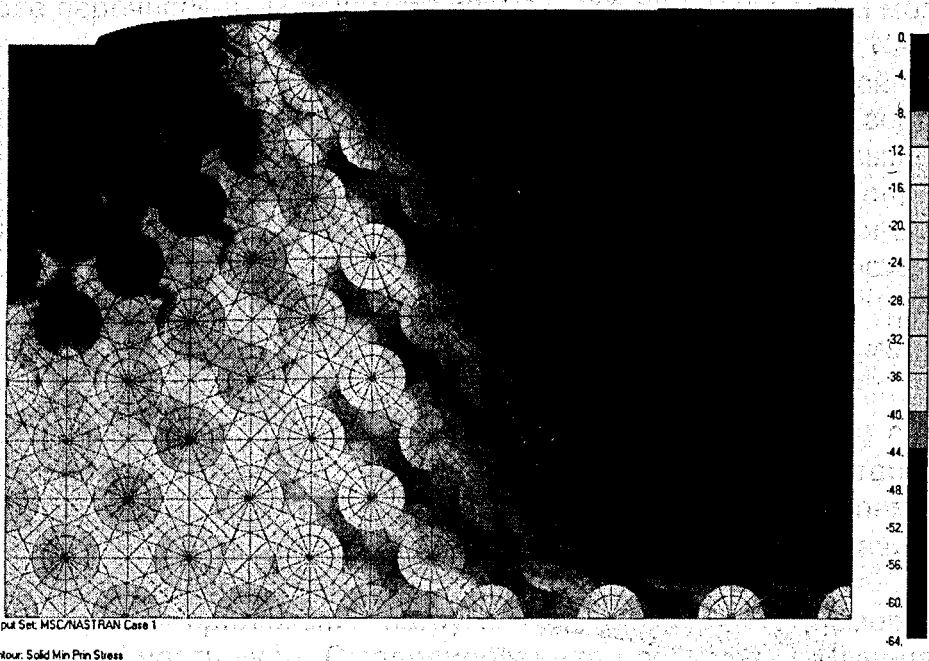
б)



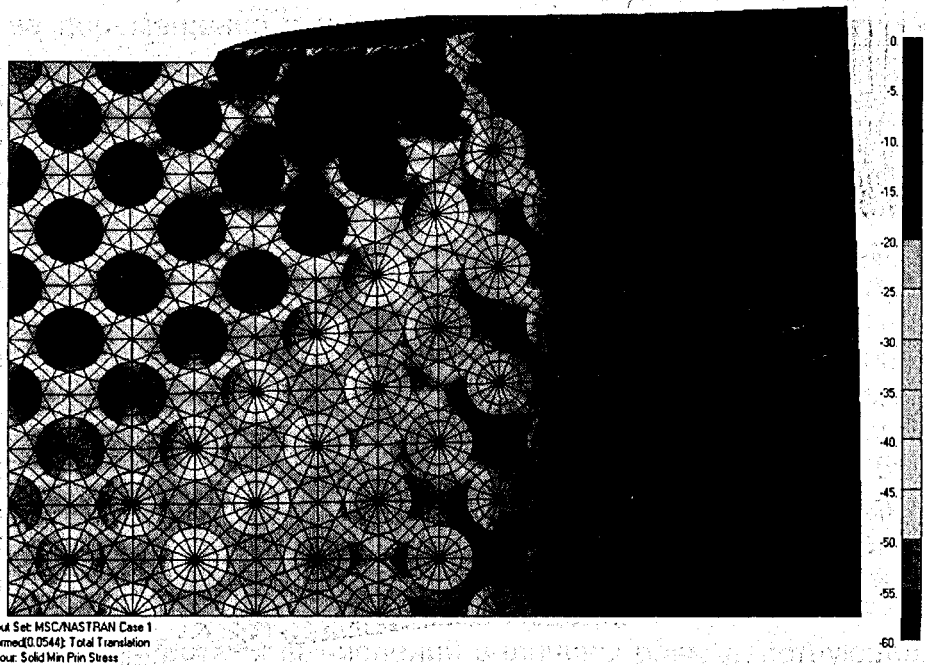
**Рис. 1.**

Общий вид модели  $1/16$  куба в деформированном состоянии: а – шифр расчета  $3/14$ ; б – шифр расчета  $7/14$ .

a)



б)



**Рис. 2.** Распределение главных сжимающих напряжений  $\sigma_{mc}$  в диагональном сечении куба: а – шифр расчета 3/14; б – шифр расчета 7/14

По результатам испытания при полном нагружении верхнего торца модели был определен интегральный модуль деформаций материала модели  $E_{mod} = 43042$  МПа.

Основные результаты расчетов конечно-элементных моделей при местном сжатии и расчетов осадок жестких штампов

| Параметр                                    | Шифр расчета |          |          |          |
|---|--------------|----------|----------|----------|
|   | 3/14         | 7/14     | 11/14    | 14/14    |
| $L$ , мм                                    | 11,25        | 26,25    | 41,25    | 52,5     |
| $R_a$ , Н                                   | 9633,6       | 27410    | 51967    | 59318    |
| $R_d = 2R_H \operatorname{tg}\alpha$        | 8940         | 10964    | 3430     | 0        |
| $B$ , мм                                    | 52,5         | 52,5     | 52,5     | 52,5     |
| $H_{mod}$ , мм                              | 53,033       | 53,033   | 53,033   | 53,033   |
| $N$ , Н                                     | 38534        | 219280   | 415736   | 474544   |
| $\Delta_{dist}^{mod}$ , мм                  | 0,053033     | 0,053033 | 0,053033 | 0,053033 |
| $H$ , мм                                    | 35,59        | 53,033   | 53,033   | 0,0      |
| $\Delta_{dist}^{cal}$ , мм                  | 0,04955      | 0,05048  | 0,05302  | 0,05320  |
| $\Delta_{dist}^{cal} / \Delta_{dist}^{mod}$ | 0,934        | 0,952    | 1,000    | 1,003    |

Затем по формуле Z. Hashin был определен теоретический модуль упругости  $E_H = \frac{(1-m_3) \cdot E_M + (1+m_3) \cdot E_3}{(1+m_3) \cdot E_M + (1-m_3) \cdot E_3} = \frac{(1-0,3538) \cdot 30000 + (1+0,3538) \cdot 90000}{(1+0,3538) \cdot 30000 + (1-0,3538) \cdot 90000} = 42895$  МПа, что отличается от полученного при конечно-элементном анализе всего на 0,4%.

Анализ картин распределения напряжений соответственно в матрице и заполнителе (рис. 2) свидетельствует о весьма высокой неоднородности напряжений в компонентах структуры бетона в зоне приложения местных нагрузок, которое следует учитывать при разработке инженерной методики деформационного расчета железобетонных элементов при местном сжатии.

В работе [5] применительно к рассматриваемой задаче была предложена расчетная модель основания с двумя коэффициентами постели. Эта модель может быть представлена с использованием физической модели М.М. Филоненко-Бородича в виде упругих работающих только на сжатие пружин, распределенных по всему сечению образца и накрытых сверху мембраной. В последней выделены две перекрестные ленты, в области пересечения которых находится место приложения нагрузки. Ленты в поперечном своем направлении считаются абсолютно жесткими, а в продольном - могут свободно изгибаться. Кроме лент в состав мембраны входят перекрестные гибкие нити, соединенные с кромками лент перпендикулярно направлению. Как ленты, так и нити натянуты постоянным горизонтально направленным погонным усилием, а в бесконечности неподвижно закреплены на контуре. Дополнительно для учета деформаций погружения на перекрестные ленты в пределах штампа установлен еще один слой пружин, жесткость которых принимается в зависимости от способа его опирания равной коэффициенту постели  $C_{b,dep}$ .

Таким образом, расчетными параметрами предлагаемой для расчета деформаций искривления модели основания являются два коэффициента постели. Первый - коэффициент сжатия  $C_1$  (размерность Н/м<sup>3</sup>), численно равен напряжению в пружинах при их единичной осадке. При этом основание считается односторонним т.е. при подъеме пружина не воспринимает растягивающих усилий. Второй коэффициент постели  $C_2$  (размерность Н/м) численно равен погонному усилию натяжения лент и гибких нитей.

Первый коэффициент можно определить по формуле  $C_1 = \frac{E_b}{H \cdot (1 - \mu^2)}$ , где  $E_b$  и  $\mu_b$  — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала основания (в данном случае бетон);  $H$  — высота слоя упругих пружин.

Что касается второго коэффициента, то для его определения рекомендуется использовать формулу  $C_2 = \frac{E_b \cdot H}{20(1 + \mu_0)}$ , где  $\mu_0 = \mu / (1 - \mu)$ .

При известной глубине слоя  $H$  расчет деформаций жесткого штампа на упругом основании с двумя коэффициентами постели не представляет трудностей. При этом при назначении высоты слоя для упругих тел ограниченных размеров рекомендуется пользоваться положениям, изложенными ранее в работе [5].

По этой методике были выполнены расчеты осадок жесткого штампа в результате деформаций искривления поверхности для условий загрузки конечно-элементных моделей). Основные исходные данные и результаты расчетов приведены выше в таблице. Как показали расчеты, наблюдается хорошая сходимость результатов расчетов осадок по методике [5] с результатами конечно-элементного анализа моделей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов И.Н., Смольский А.Е., Скочеляс В.В. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. — Минск: Наука и техника, 1973. — 232 с.
2. Nielsen A. and Monteiro P. Concrete: a three phase material // Cement and Concrete Research. — 1993. — Vol. 23. — P.147—151.
3. Ramesh G., Sotelino E. and Chen W. Effect of Transition Zone on Elastic Stresses in Concrete Materials // Journal of Materials in Civil Engineering. — 1998. — Vol.10, № 4. — P.275—282.
4. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. — Минск: Наука и техника, 1977. — 232 с.
5. Rak N. Calculation of Reinforced Concrete Member Deformation Under Local Compression // Modern Building Materials, Structures and Techniques: Proceedings of 4th international conference. — Vilnius, Technika, 1995. — Vol. II. — P. 46—51.

УДК 624.075.23.001.24

Садовский Ю.И.

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОРЦЕВЫХ ЗОН ШАРНИРНО ОПЕРТЫХ КОЛОНН КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

Проведенные ранее в БГПА экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния торцевых зон шарнирно опертых колонн кольцевого сечения с бетонным ядром во внутренней полости на участке ограниченной длины [1] позволили выявить основные закономерности их работы при осевом сжатии. Исследования проводились применительно к объекту внедрения центрифугированных колонн в каркасах зданий связевой схемы с элементами жесткости [2]. Были получены две схемы разрушения — по торцевому сечению от продольного раскола стенки колонны, начинающегося у торцевой поверхности колонны и по бетону полого сече-