

## СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

В. В. ПИНАДЖЯН

НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЕГКОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА НА  
ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ\*

В 50-х годах были получены легкие конструктивные бетоны марок 150 и выше на естественных заполнителях вулканического происхождения, нашедшие в дальнейшем широкое применение в гражданском, промышленном и впервые и гидротехническом строительстве. Несколько позже, на основе литонидной немзы и негаснущего перлита были получены сравнительно высокопрочные легкие бетоны марок 300–350 в производственных условиях и 400–500 в лабораторных условиях (А. А. Аракелян, М. Э. Симонов и др.). К этому же времени относятся первые попытки применения легкого бетона на естественных заполнителях в предварительно напряженных конструкциях.

Выявленные в Армянской ССР промышленные запасы естественных пористых каменных материалов, исчисляемые несколькими миллиардами кубических метров, перспективность применения легких бетонов в создании новых конструктивных форм, в особенности для сейсмических районов, где облегчение веса конструкций имеет первостепенное значение, и отсутствие в действующих СНиП многих важных расчетных параметров, необходимых для проектирования конструкций из легких, сравнительно высокомарочных бетонов, стимулировали проведение соответствующих комплексных научных исследований. В связи с этим в Армянском НИИ стройматериалов и сооружений (АИСМ) были начаты систематические исследования прочностных и деформационных свойств, по выявлению долговечности, совершенствованию технологии производства и экономики легкого бетона и железобетона.

В данном сообщении рассматриваются лишь некоторые основные вопросы, касающиеся сопротивления легкого железобетона на естественных заполнителях, которые в течение ряда лет изучались в возглавляемой автором лаборатории.

Исследования, носившие преимущественно экспериментальный характер, имели целью получение необходимых данных для составления

\* Доложено на Всесоюзной конференции по теоретическим основам расчета строительных конструкций в Москве в январе 1970 г.

нормативных положений, регламентирующих проектирование обычных и предварительно напряженных конструкций из легких бетонов на природных пористых заполнителях.

### Основные результаты исследования

(1) *Прочность при растяжении.* Сопротивление конструктивного легкого бетона при осевом растяжении меньше, чем у тяжелого, причем, расхождение от 10 % для бетона марки 200 увеличивается до 40 % для марки 400. Объясняется это характером разрушения: в образцах из легкого бетона разрыв происходит по цементному камню и заполнителю в отличие от образцов из тяжелого бетона, где разрушение обычно наблюдается по контакту цементного камня и заполнителя. Кстати, формула Пере в рассматриваемом случае дает преувеличенные результаты [1,19]. Отношение прочности легкого бетона на растяжение при изгибе к прочности при осевом растяжении в среднем равно двум.

(2) *Прочность при осевом сжатии.* При одинаковых условиях получение конструктивного легкого бетона марки 200 и выше требует увеличения расхода цемента по сравнению с тяжелым: небольшого для марки 200 и от 15 до 30 % (в зависимости от вида заполнителя) для бетона марки 400. Вследствие большей деформативности пористого заполнителя и повышенного расхода цемента модуль упругости легкого бетона получается в 1,5—2 раза меньше, чем у бетонов на плотных заполнителях. При одинаковых условиях доля пластических в полных деформациях бетона уменьшается с увеличением прочности бетона. Значение коэффициента упругости легкого бетона выше, чем тяжелого на 10—20 %. Предельная сжимаемость легкого бетона в зависимости от прочности и возраста составляет 2—3 мм/м и обычно выше, чем у тяжелого, примерно на 20 %. Усадка и ползучесть легкого бетона больше, чем у тяжелого [2].

Призмная прочность легкого бетона больше, чем у тяжелого, и в среднем равна 0,8 от кубиковой. Здесь, по-видимому, немаловажную роль играет повышенная деформативность легкого бетона, в котором упругие характеристики заполнителя и цементного камня — величины одного порядка, в отличие от тяжелого бетона, где эти величины обычно существенно отличаются друг от друга и, поэтому, вероятность концентрации напряжений и понижения прочности бетона возрастает.

(3) *Прочность бетона на сжатие при изгибе.* Опыты проводились над перестроенными балками. Прямыми измерениями (с помощью синхронно действующих датчиков) нагрузок и соответствующих им напряжений определялись эпюры напряжений сжатого бетона вплоть до стадии, непосредственно предшествующей разрушению балок. Для балок из бетонов средней прочности (марки 150—200) эпюра напряжений имеет криволинейное очертание с существенным развитием пластических деформаций [3]. Максимальная ордината эпюры напряжений в этом случае оказывается сдвинутой в сторону нейтральной оси и распола-

гается на расстоянии примерно половины высоты сжатой зоны бетона. Очертание эпюры напряжений сжатого бетона для балок из высокомарочных легких бетонов (марки 300 и выше) описывается квадратной параболой; при этом максимальная ордината находится на уровне сжатой грани балки. По опытным данным отношение  $R_{сж}/R_{ср}$  получается равным 1,04 и 1,14, соответственно для балок из легких бетонов средних и высоких марок. Эти результаты показывают, что в расчетных формулах СНиП для внецентренно сжатых и изгибаемых элементов из легких бетонов средних и высоких марок можно без существенных погрешностей вместо двух расчетных параметров бетона —  $R_{сж}$  и  $R_{ср}$  пользоваться только одним — призмочной прочностью бетона  $R_{ср}$ .

(4) *Прочность на срез*. Испытания нескольких серий образцов показали, что прочность легкого бетона марки 150 на срез примерно такая же, как для тяжелого. Для бетонов более высоких марок сопротивление срезу меньше, чем у тяжелых. С увеличением прочности бетона расхождение возрастает и достигает 15% при марке бетона 400 [4]. Здесь следует отметить, что между прочностными характеристиками бетона на срез, растяжение и сжатие наблюдается устойчивая корреляция. В рассматриваемом случае пониженная сопротивляемость легкого бетона при растяжении (до 40%) компенсируется в некоторой мере повышенной призмочной прочностью.

(5) *Усталостная прочность*. Испытания большой партии призм из легких бетонов марок от 200 до 500 на литонидной пемзе и перлите под многократно-повторной сжимающей нагрузкой, с варьированием характеристики цикла нагрузки в диапазоне от 0,13 до 0,95, при базе испытаний 2 млн. циклов показали, что усталостная прочность легкого бетона при одинаковых условиях не ниже, чем у тяжелого [2,5]. Повышение однородности структуры и прочности бетона увеличивает усталостную прочность. Абсолютный предел выносливости находится далеко за пределами 2 млн. циклов нагружений. Повторное нагружение серии предварительно напряженных балок из легкого бетона, армированных высокопрочной проволокой и стержневой арматурой, на базе 2 млн. циклов нагружений при изменении характеристики цикла нагрузки от 0,25 до 0,94 не привело к заметному уменьшению их прочности. Жесткость балок понизилась примерно на 50% по сравнению с жесткостью балок-близнецов при однократном статическом нагружении. Установлено, что с увеличением предварительного обжатия бетона выносливость балок увеличивается. Величина коэффициента  $n'$  (отношение модуля упругости арматуры к условному модулю упругости бетона, по которому определяется напряжение в арматуре при циклических нагрузках) для конструкций из легких бетонов получается вдвое больше, чем нормированная величина для тяжелого бетона [6].

(6) *Сопротивление удару*. Коэффициент внутреннего трения для легкого бетона по опытам Т. А. Горояна, изучавшего свободные колебания железобетонных стоек, заземленных одним концом, меньше, чем для тяжелого бетона [7]. Отношение упругих деформаций к полным

при одинаковых условиях в легком бетоне больше, чем в тяжелом. С другой стороны, чем меньше коэффициент поглощения энергии, тем большая часть динамических воздействий расходуется на разрушение. Поэтому сопротивление легкого железобетона ударным воздействиям должно быть меньше, чем тяжелого.

(7) *Коэффициент температурного расширения.* Величина коэффициента разная для высоких и низких температур. Она зависит также от содержания в бетоне количества цемента и воды. Для конструктивных легких бетонов на естественных заполнителях (литоидная пемза, не-вспученный перлит, туф ереванского типа) величина  $\alpha$ , при положительной температуре до  $75^\circ\text{C}$  изменяется в пределах  $(7,7 - 8,0) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  [8].

(8) *Сцепление арматуры с бетоном. Длина зоны анкеровки.* Объем экспериментальных работ предусматривал возможно всестороннее изучение сцепления арматуры и легкого бетона—основного фактора, обуславливающего жесткость, трещиностойкость и долговечность железобетонных конструкций. Напряженно-деформированное состояние изучалось при вытягивании стержней из центрально-армированных бетонных призм, а также в обычных и предварительно напряженных балочных образцах. Наряду с образцами из легких бетонов марок от 75 до 400 на разных заполнителях, армированными гладкими профилированными стержнями и прядями, изучались эталонные образцы из тяжелого бетона [9].

Результаты проведенных исследований показывают, что при одинаковых условиях прочность сцепления стержневой арматуры и прядей с легкими бетонами низких марок (нулканический шлак, ириндская пемза и др.) несколько выше, чем для бетонов на тяжелых заполнителях. Для легких бетонов марки 200 и выше на литоидной пемзе и не-вспученном перлите прочность сцепления с арматурой меньше, чем для тяжелых, и расхождение увеличивается до  $20\%$  с повышением марки бетона до 400, что находит свое объяснение в меньшей сопротивляемости пористых заполнителей растяжению и сжатию, повышенным содержанием цемента и низким модулем упругости материала, вследствие чего зона передачи нагрузки увеличивается. Сцепление арматуры периодического профиля с легкими бетонами по сравнению с гладкой возрастает в среднем в три раза.

Длина зоны анкеровки стержневой и прядевой арматуры, осуществляемой только силами сцепления, в высокомарочных легких бетонах получается на  $15 - 20\%$  больше нормативных величин, рекомендованных для других видов бетонов [10, 11].

(9) *Сопротивление сжатых колонн.* Изучалась несущая способность нескольких серий коротких и гибких колонн из легкого железобетона марок 200—400 армированных стержнями классов А—I и А—II при центральном и внецентренном кратковременном сжатии [12]. Установлено, что сжатые элементы из легкого бетона подчиняются тем же закономерностям, что и из тяжелого. Некоторые особенности, име-

ющие количественный, а не качественный характер, обусловлены прочностными и деформационными характеристиками легкого бетона. Исчерпание несущей способности центрально-сжатых коротких колонн характеризуется одновременным достижением бетона призматической прочности, а арматуры — предела текучести. Благодаря повышенной предельной сжимаемости легкого бетона, величина сопротивления сжатой арматуры может быть принята более  $4000 \text{ кг/см}^2$ , вместо  $3600 \text{ кг/см}^2$ , принятой по нормам для тяжелого бетона.

В расчетных формулах СНиП при первом случае внецентренного сжатия коротких колонн, вследствие ограниченного развития пластических деформаций в конструктивных легких бетонах, величину момента, воспринимаемого бетоном сжатой зоны сечения, следует уменьшить на 20%, с одновременной заменой  $R_b$  на  $R_{br}$ . Анализ опытных данных показывает, что, ввиду пониженного модуля упругости легкого бетона, при определении расчетной нагрузки гибких колонн нормативная характеристика жесткости  $C$  должна быть умножена на коэффициент 0,75.

(10) *Сопротивление при кручении.* Испытанию на кручение были подвергнуты несколько серий армированных и неармированных балок прямоугольного сечения из легкого бетона марок 150 — 350 [13]. Отношение крутящих моментов к изгибающим  $\lambda = M_{кр}/M_{из}$  варьировалось в очень широких пределах.

По результатам проведенных исследований несущая способность неармированных балок хорошо описывается формулой пластического кручения А. Надаи при условии, если в качестве прочностной характеристики принимается предел прочности бетона на разрыв  $R_r$ . По этой же формуле может быть определено усилие трещинообразования армированных балок при кручении. Несущая способность железобетонных балок на кручение по сравнению с бетонными может быть увеличена только при одновременном продольном и поперечном армировании. Сопротивление предварительно напряженного легкого бетона при кручении возрастает с увеличением интенсивности предварительного обжатия [14]. Несущая способность балок получается меньше, чем для балок из тяжелого бетона, что обусловлено меньшей сопротивляемостью легкого бетона при растяжении по диагонали. Формулы действующих нормативных положений для случая изгиба с кручением дает удовлетворительные результаты когда  $\lambda < 0,2$ . При большей величине  $\lambda$  формулы СНиП нуждаются в уточнении.

(11) *Сопротивление элементов при действии поперечной силы.* Испытания проводились с целью изучения влияния поперечной и продольной арматуры на процесс образования и развития трещин и выявления характера разрушения балок из легкого железобетона по наклонным сечениям [15, 16]. Результаты эксперимента показывают, что роль бетона в сопротивлении балок по наклонным сечениям, при относительно высоких марках бетона, действующими нормами переоцениваются. Вместо коэффициента 0,15, входящего в величину проекции предель-

ного усилия в бетоне на нормаль к продольной оси изгибаемого элемента, для балок из легкого бетона  $M-400$  следует принять 0,11. В сопротивлении балок по наклонным сечениям заметную роль играет продольная рабочая арматура, претерпевающая срез. С увеличением диаметра продольной арматуры ее влияние возрастает.

(12) *Граница оптимального армирования.* Исследованию были подвергнуты балки из легкого бетона на литондной пемзе, в которых варьировались марка бетона, коэффициент армирования сечения и класс арматуры [17]. Определялась граница оптимального армирования, характеризующаяся одновременным достижением в стадии разрушения элемента: арматуры—предела текучести, бетона—предела прочности на сжатие. По результатам проведенных исследований рекомендуется коэффициент  $\zeta$  для балок симметричного сечения из легкого бетона марки 150 оставить равным 0,8, как это принято в действующих нормах. Для бетона марки 250 следует принять  $\zeta = 0,7$ , а для бетона марки 350 и выше равным 0,65.

### Заключение

Резюмируя, отметим, что легкие бетоны марки 150—400 на естественных заполнителях являются эффективным конструкционным материалом (в том числе и для предварительно напряженных конструкций) при обязательном учете в стадиях проектирования и строительства специфических свойств легких бетонов и четкого представления рациональной области их применения.

Нормативные и расчетные характеристики легких бетонов следует назначать с большей осторожностью, чем тяжелого, имея в виду относительно меньшую сопротивляемость конструктивных легких бетонов при растяжении, срезе, кручении, ударных воздействиях, а также их повышенную деформативность (модуль деформации, деформации ползучести и усадки).

Результаты исследований были учтены при разработке и внедрении обычных и предварительно напряженных элементов несущих конструкций из легких бетонов на литондной пемзе для промышленного, гражданского и энергетического строительства, а также в [18].

Проведенные работы являются первым этапом исследований. В дальнейшем необходимо изучить вопросы прочности и деформативности легкого бетона, в том числе предварительно напряженного, с учетом длительности процессов; изучить поведение конструкций из легких бетонов в условиях транспортировки, монтажа и длительной эксплуатации. Разумеется, следует продолжить изучение и других задач этой проблемы, и в первую очередь—в аспекте долговечности и экономики.

Автор признателен проф. А. А. Гвоздеву за ценные советы, данные им в процессе проведения данных исследований.

## Վ. Վ. ՓԻՆԱԺՅԱՆ

ՅՆԱԿԱՆ ԼՅԻՉՆԵՐՈՎ ԹԵՓԵՎ ԵՐԿԱՄԲԵՏՈՆԻ ԳԻՄՆԳՐՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ  
ՈՒՈՒԻՆԱՍԻՐՄԱՆ ՈՐՈՇ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԱՐԳՅՈՒՆՔՆԵՐԸ

## Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Բերված են կարճատև, երկարատև, ինչպես նաև բազմափուլ ա հարվածա-  
յին բեռնավորման դեպքում բնական լցիչներով (պեղտիտ, լիթոֆոսֆատ, սև-  
առ, հրաբխային խարամներ, տուֆեր) թևին Լրկաթբետոնն ապրահան և  
նախաշարված էլեմենտների աշխատանքի առավելագույն փորձարարական  
բնույթի առումնաբերությունների արդյունքները: Նշվում է՝ ծանր բեռների  
համեմատությամբ բնական լցիչներով թևին բետոնի հարաբերակամարեն փոր-  
դիմադրողականությունը ձգմանը, ոլորմանը և կտրմանը:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Ионнисян С. Г.* Исследование предварительно напряженных элементов из высокопрочных легких бетонов на естественных заполнителях. (Автореферат кандидатской диссертации). НИИЖБ, М., 1966.
2. *Пинаджян В. В., Епоян А. О.* Статическая и усталостная прочность легких бетонов на естественных заполнителях. Научные сообщения АИСМ, вып. 8, Ереван, 1966.
3. *Карапетян В. А.* Экспериментальное изучение распределения напряжений в сжатом бетоне балок из легкого железобетона. «Известия АН Арм ССР (серия ТН)», т. XXII, № 5, 1969.
4. *Азарян Р. Г.* Исследование прочности армированных и неармированных образцов из легкого бетона на срез. «Промышленность Армении», № 9, 1969.
5. *Пинаджян В. В., Епоян А. О.* Усталостная прочность легких бетонов на литонд-ной пемзе и перлите. Сб. «Вопросы применения легкого бетона на естественных заполнителях в строительстве», Ереван, 1967.
6. *Епоян А. О., Чифтиларян И. А.* Деформации легких бетонов на естественных заполнителях при многократно повторяющейся сжимающей нагрузке. Научные сообщения АИСМ, вып. 8, Ереван, 1966.
7. *Гороян Т. А.* Экспериментальное исследование рассеяния энергии при изгибных колебаниях стоек из легкого железобетона. Научные сообщения АИСМ, вып. 7, Ереван, 1966.
8. *Австисян Р. С., Пирадов А. Б., Асирян В. Г.* О коэффициенте линейного расширения легких бетонов на естественных заполнителях. «Известия АН Арм ССР (серия ТН)», т. XIX, № 4, 1966.
9. *Шакарян А. С.* Экспериментальное исследование прочности сцепления арматуры классов А-I и А-III с легким бетоном на литондной пемзе. Научные сообщения АИСМ, вып. 8, Ереван, 1966.
10. *Шакарян А. С.* Исследование прочности сцепления стержневой арматуры с легкими бетонами марок 75-100 на естественных заполнителях. (Кандидатская диссертация), Ереван, 1968.
11. *Австисян Р. С., Шакарян А. С.* Экспериментальное исследование прочности сцепления и длины зоны анкеровки арматуры с легкими бетонами на литондной пемзе. Сб. «Вопросы применения легкого бетона на естественных заполнителях в строительстве», Ереван, 1967.
12. *Варданпетян А. А.* Исследование несущей способности и деформативности сжа-

- тых железобетонных элементов из высокопрочного легкого бетона на естественных опалочниках. (Кандидатская диссертация). Ереван, 1970.
- 13 *Белубекян А. В.* Экспериментальное исследование несущей способности балок из легкого железобетона при совместном действии изгиба и кручения. „Известия АН АрмССР (серия ТН)“, т. XXI, № 5, 1968.
  - 14 *Белубекян А. В.* Экспериментальное исследование работы предварительно напряженных балок из легкого бетона при изгибе с кручением. „Известия АН АрмССР (серия ТН)“, т. XXIII, № 1, 1970.
  - 15 *Аварян Р. Г., Бабаян А. А.* К вопросу трещиностойкости и прочности наклонных сечений балок из легкого железобетона при отсутствии поперечной арматуры. „Известия АН АрмССР (серия ТН)“, т. XXII, № 6, 1969.
  - 16 *Бабаян А. А., Аварян Р. Г.* Экспериментальное исследование несущей способности изгибаемых элементов из легкого железобетона по наклонным сечениям. „Известия АН АрмССР (серия ТН)“, т. XXII, № 2, 1969.
  - 17 *Карапетян В. А.* К вопросу границы армирования изгибаемых элементов из легкого железобетона на литой цементной стяжке. „Известия АН АрмССР (серия ТН)“, т. XXI, № 4, 1968.
  - 18 *Рекомендации по проектированию конструкций из легких бетонов.* М., 1970.
  - 19 *Հովհաննիսյան Հ. Վ. Իրվարկանական և Կոնստրուկտիվ զեֆեկտիվությունները.* Акопян А. В. Деформации железобетонных элементов. (На армянском языке). Изд. „Айтаст“, Ереван, 1966.