

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

КУРАН ШЕХАДЕ АХМЕД

УДК 624.012.044

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ВНЕЦЕНТРЕЙНО СЖАТЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО
ВЯЖУЩЕГО ПРИ ПОВТОРНЫХ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск – 1993

№ 27.368

Работа выполнена на кафедре строительных конструкций в Криворожском ордена Трудового Красного Знамени горнорудном институте

- Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент В.И.Гончаров
- Научный консультант - кандидат технических наук В.Н.Чирва
- Официальные оппоненты:
 - доктор технических наук, профессор Баташев В.М.
 - кандидат технических наук, доцент Изотов Ю.Л.
- Ведущая организация - Криворожский филиал ГПИ "Днепрогражданпроект"

Защита состоится " 26 " мая 1993 г. в 13.00 час. на заседании специализированного совета К 066.32.01 в Днепропетровском инженерно-строительном институте по адресу: 320600, ГСП, г.Днепропетровск, ул. Чернышевского, 24-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " 26 " апреля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук,
доцент

В.Л.Седин
В.Л.Седин

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00815145 (0)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современном этапе развития капитального строительства требуется увеличение производства строительных материалов и конструкций, снижение их стоимости, повышение их качества, надежности и долговечности. Выполнение этих задач в значительной степени зависит от успешного развития исследований, направленных на изыскание новых экономичных высокоэффективных вяжущих, позволяющих расширить сырьевую базу строительства за счет использования местного сырья и отходов промышленного производства.

Известно, что практически все конструкции в процессе эксплуатации подвергаются многократным повторным нагрузениям, величина которых в ряде случаев может превосходить эксплуатационные уровни и носить случайный характер. К таким воздействиям относятся аварийные, сейсмические, технологические, температурно-влажностные нагрузки. Действующие нормативные документы при расчете конструкций не производят учет особенностей работы железобетона в реальных условиях, подверженных случайным нагрузкам. Между тем, малопиковое нагружение под действием роста и накопления остаточных деформаций, увеличения числа трещин, нарушения сцепления бетона с арматурой, может приводить к исчерпанию несущей способности, преждевременному выходу из строя. Среди различных конструктивных элементов гражданских и промышленных зданий и сооружений колонны наиболее часто подвергаются технологическим и аварийным воздействиям, что и предопределило цель настоящего исследования.

Следует отметить, что актуальной проблемой при решении задач строительства является применение и внедрение эффективных местных материалов на основе вяжущих, обладающих комплексом специальных свойств. Наибольшее распространение в районах добычи и производства черных и цветных металлов получили шлакощелочные вяжущие, представляющие собой композицию из тонкомолотых доменных гранулированных шлаков и щелочных компонентов. Высокая активность вяжущего дает возможность широко применять местные некондиционные заполнители, отходы карьеров и производств металлургической, угольной, химической и др. видов промышленности, и тем самым значительно расширить сырьевую базу строительства без больших капитальных вложений. Щелочная среда повышает морозостойкость, коррозионную стойкость, хорошо защищает арматуру в армированных конструкциях, что увеличивает долговечность зданий и со-

ружений. Бетоны, выполненные с применением высокоактивного щелочного вяжущего, не уступают по своим эксплуатационным свойствам традиционным бетонам. Однако, исследования по применению шлакощелочного бетона для изготовления строительных конструкций, эксплуатируемых при различных режимах загрузки, весьма недостаточны, что и вызвало необходимость выполнения настоящей работы, которая посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых шлакощелочных элементов при воздействии кратковременных однократных и многократных повторных нагрузок.

Цель работы: экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния шлакощелочного бетона и внецентренно сжатых железобетонных элементов в условиях кратковременного действия постоянной и переменной нагрузок различной интенсивности, а также разработка методики оценки особенностей их работы при такого рода воздействиях.

Автор защищает:

1. Методику испытаний и результаты экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик шлакощелочного бетона при случайных нестационарных воздействиях.
2. Методику и результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов при многократно повторных нагружениях.
3. Методику усовершенствованного способа учета реальных свойств бетона при оценке напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов при повторных статических нагрузках.

Научно новизна:

1. Разработана методика экспериментальных исследований и выявлены закономерности деформирования шлакощелочного бетона при случайных нагрузках.
2. Впервые получены экспериментальные данные о влиянии кратковременных многократно повторных статических нагрузок на прочность и деформативность внецентренно сжатых шлакощелочных элементов.
3. Предложена методика определения напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов с учетом режима нагружения.

4. На основе полученных данных предложена методика определения диссипации энергии бетонных и железобетонных элементов при многократно повторных нагружениях.

Практическое значение и внедрение результатов работы.

Проведенные экспериментальные исследования внецентренно сжатых шлакощелочных элементов позволяют более достоверно оценить напряженно-деформированное состояние конструкций, находящихся в условиях сложных режимов силового воздействия, что способствует повышению качества и надежности при эксплуатации.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты работы доложены и одобрены на научно-технических конференциях Криворожского горнорудного института в 1991, 1992 г.г.

По теме диссертации опубликовано две статьи.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 145 наименований. Работа изложена на 90 страницах машинописного текста иллюстрирована 30 рисунками (30 страниц), содержит 13 таблиц.

Диссертационная работа выполнена на кафедре строительных конструкций Криворожского горнорудного института под руководством кандидата технических наук, доцента В.И.Гончарова и кандидата технических наук В.Н.Чирвы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Состояние вопроса. Анализ исследований основных физико-механических свойств бетонов на основе шлакощелочного вяжущего, выполненных Б.Д.Глуховским, В.И.Гончаровым, В.И.Гончаром, Б.В.Жадановским, В.М.Ильенко, В.П.Ильиным, П.В.Кривенко М.А.Мешанским, В.А.Пахомовым, И.А.Пашковым, Р.У.Руновой, Л.И.Стороженко, и др., показал, что едкие щелочи или жидкие стекла их содержащие, в сочетании со шлаками прочно связывают дисперсные заполнители типа мелких песков и супесей в камень с высокой прочностью. Высокая прочность изделий из доменного шлака и низко модульного жидкого стекла (от 10 до 120 МПа) обусловлена высокой адгезионной способностью жидкого стекла и зависит от вида шлака, шлакощелочного вяжущего, модуля жидкого стекла, плотности, стеклошлакового отношения, местных заполнителей с минералогическими, гранулометрическими, химическими свойствами, видов

уплотнения, твердения и т.д., что необходимо учитывать при проектировании конструкций.

Исследования напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных элементов при малом числе циклов нагружения, проведенные Е.М.Бабычем, В.М.Бондаренко, В.И.Гончаровым, А.С.Залесовым, Н.И.Карпенко, А.М.Кокаревым, Д.Р.Маиляном, Д.Р.Маиляном, И.А.Матаровым, А.П.Погорелюком, В.А.Ржевским, В.В.Руденко, Г.Н.Ставровым, Л.И.Стороженко, Т.Л.Чирвой, А.В.Щиным и др., позволили рассмотреть изменение прочностных и деформативных характеристик изгибаемых и сжатых элементов. Установлено, что немногочисленные повторные нагрузки приводят к изменению напряженно-деформированного состояния конструкций. Это обусловлено нелинейными свойствами конструкций, проявляющимися на первых циклах нагружения, возникновением и накоплением остаточных деформаций.

Повышенный интерес к работе бетонных и железобетонных внецентренно сжатых элементов объясняется тем, что в условиях внецентренного сжатия работают практически все бетонные и большая часть железобетонных конструкций. Возникает проблема более оптимального конструирования колонн с применением эффективных материалов. Традиционные методы расчета внецентренно сжатых элементов, основанные на ряде упрощенных предположений, позволяют довольно точно решать некоторые задачи внецентренного сжатия при однократном статическом приложении нагрузки.

Проведенный анализ экспериментально-теоретических работ, выполненных различными авторами, позволяет сделать вывод о том, что до настоящего времени практически не исследовано изменение напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов при действии малосциловых нагрузок. Исходя из этого, были сформулированы следующие задачи:

1. Разработать методику исследования бетона при случайных нагружениях с целью получения вероятностных характеристик параметров напряженно-деформированного состояния.
2. Получить экспериментальные данные о влиянии повторных нагрузок на прочность и деформации внецентренно сжатых элементов.
3. Получить экспериментальные данные для построения аналитической модели несущей способности сжатых элементов с малыми

эксцентриситетами.

4. Изучить диссипацию энергии бетона и сжатых элементов при многократных повторных нагружениях.

5. На основе анализа экспериментального и теоретического материала дать практические рекомендации по оценке несущей способности внецентренно сжатых элементов при малоцикловых нагрузках.

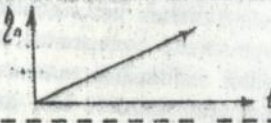
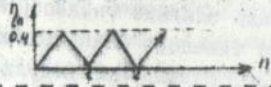
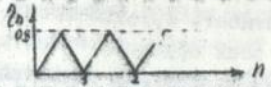
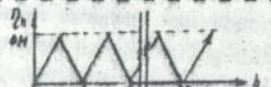
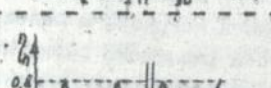

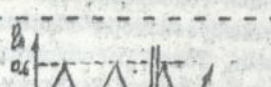
Методика экспериментальных исследований внецентренно сжатых элементов. Определение объема экспериментальных исследований проводилось на основе активного эксперимента, содержание которого приведено в табл. I. Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены стойки сечением 200x200 мм, длиной 1200 мм. Принятая длина стоек исключала влияние гибкости на работу элемента. Образцы выполнены из тяжелого шлакощелочного бетона класса В 30 состава 1:0,70:1,39, силикатный модуль жидкого стекла составил 1,15 г/см³, плотность 1,1-1,3 г/см³.

В качестве рабочей арматуры во всех образцах принята стержневая арматура периодического профиля класса А-III диаметром 16 мм. До начала бетонирования на каждом продольном стержне наклеивались тензорезисторы с базой 20 мм. Поперечное армирование выполнено из гладких стержней класса А-I, диаметром 6 мм. Для предотвращения продавливания от внешней нагрузки и смятия (местное сжатие) в верхней части стоек размещены сетки из арматуры класса А-I диаметром 4 мм. Коэффициент продольного армирования был принят $\mu_s = 2\%$. Измерение деформаций бетона в стойках в процессе испытаний производилось с двух сторон. В качестве измерительного прибора использовали тензорезисторы с базой 50 мм. По принятой схеме наклейки тензорезисторы образовали пять цепочек в продольном направлении. Такое расположение приборов позволило получить данные о деформировании различных зон образца при приложении внешней нагрузки с различными величинами эксцентриситетов. Для измерения продольных деформаций бетона на уровне рабочей арматуры в средней части образцов устанавливали индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 200 мм. Измерение прогибов производилось с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, расположенных в середине пролета и на опорах.

По характеру воздействия продольной нагрузки образцы разде-

Таблица I

Объем и содержание кратковременных испытаний внецентренно сжатых шлакощелочных стоек

Серия	Количество, шт	Характеристика внешнего воздействия	$\frac{e_0}{h}$	Характеристики циклов		Цель испытаний
				уровень нагружения	число циклов	
КШ-1	2		0,15	-	-	Определение несущей способности, деформативности
КШ-2	2		0,25			
КШ-3	2		0,33			
К-1	2		0,15	0,4/0	2	Исследование влияния режима нагружения на прочностные и деформативные свойства стоек при повторных нагружениях
К-2	2		0,25			
К-3	2		0,15	0,8/0	2	
К-4	2		0,25			
К-5	2		0,15	0,4/0	30	
К-6	2		0,25			
К-7	2		0,15	0,8/0	30	
К-8	2		0,25			
К-9	2		0,33	0,6/0	15	
Прив-12 мы	12		100x100x400			Изучение влияния случайных нагрузок на деформативность шлакощелочного бетона

лены на две группы. Первая включала образцы серии КШ, испытанные на статическую однократную нагрузку, а вторая — на повторную нагрузку низкого и высокого уровней с полной разгрузкой (серии К-1, ..., К-9). По результатам испытаний образцов первой группы устанавливали уровни повторного нагружения. Такая методика эксперимента позволила выявить влияние повторных нагружений на прочностные и деформативные характеристики конструкций. Нагружение и разгрузка образцов до заданного уровня каждой серии производилась ступенями по 0,1 от разрушающей нагрузки.

Реализация поставленных задач немислима без получения дополнительных данных о прочностных и деформативных характеристиках выбранного вида бетона при различных режимах нагружения. Результаты таких испытаний использовали при оценке напряженно-деформированного состояния внецентренно-сжатых элементов.

Статистический анализ диаграмм деформирования σ - ϵ , полученных при экспериментальных исследованиях шлакощелочных призм, показывает, что последние при однократном сжатии удовлетворительно аппроксимируются полиномом пятой степени:

$$\sigma = R_{\sigma} \left(6,936 \times 10^{-12} \epsilon^{*5} - 3,3059 \times 10^{-9} \epsilon^{*4} + 556,18 \times 10^{-9} \epsilon^{*3} - 60,021 \times 10^{-6} \epsilon^{*2} + 9,3856 \times 10^{-3} \epsilon^{*} + 8,5309 \times 10^{-3} \right), \quad (1)$$

где $\epsilon^* = \epsilon \times 10^{-5}$, $[R_{\sigma}] = \text{МПа}$, $[\sigma] = \text{МПа}$.

Простая аналитическая зависимость σ - ϵ позволяет определять полную энергию разрушения при однократном нагружении:

$$W = \int^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

Величина этой энергии дает возможность находить количество циклов до разрушения при повторных нагружениях.

Напряженно-деформированное состояние внецентренно сжатых элементов при однократном нагружении. Результаты испытаний стоек с величиной эксцентриситета $e_0/h = 0,15; 0,25; 0,33$ (серии КШ-1, КШ-2, КШ-3) показали, что разрушение происходило со стороны более сжатой грани элемента, вследствие постепенного раздробления бетона сжатой зоны. При этом, в сжатой зоне средней части высоты образца наблюдалось выкалывание бетона защитного слоя и оголение стержней рабочей арматуры. Несудая способность сжатых элементов серии КШ-1 с $e_0/h = 0,15$ составила 638 кН, серии КШ-2

с $e_0/h = 0,25 - 510$ кН, серия ИШ-3 с $e_0/h = 0,33 - 474$ кН. Теоретические значения несущей способности шлакощелочных стоек определяли по СНиП 2.03.01-84 "Бетонные и железобетонные конструкции" и по методике В.И.Гончарова. Теоретические значения несущей способности коротких внецентренно сжатых элементов, вычисленные согласно СНиП, оказались на 5-12% выше опытных. Несущая способность стоек, определенная по методике В.И.Гончарова, удовлетворительно совпала с опытными. Из этого следует, что при определении несущей способности внецентренно сжатых элементов из шлакощелочного бетона, необходимо использовать скорректированные формулы с учетом специфических особенностей данного материала.

По результатам измерений продольных деформаций построены графики изменения относительных деформаций бетона поперечного сечения средней части колонны на различных ступенях нагружения. Максимальные значения деформаций, измеренные с помощью тензорезисторов, для коротких внецентренно сжатых элементов наблюдаются вдоль оси приложения нагрузки и колеблются в пределах $\epsilon_s = 150-200 \times 10^{-5}$. Характер развития деформаций в бетоне серии ИШ-1 обусловлен процессом микроразрушения, который привел к развитию пластических деформаций. При $F = 0,9 F_{раск}$ в зоне, наиболее удаленной от сжимающей силы, появились видимые трещины, способствующие образованию поверхностей разрыва. Как показали опытные данные, с увеличением значения эксцентриситета наблюдается рост градиента поля деформаций.

Выбранная схема расположения приборов позволила получить данные о характере распределения деформаций по высоте опытных образцов. Отмечено, что зоны концентраций максимальных деформаций определяют место разрушения образцов.

Исследовано влияние однократно приложенной нагрузки на характер смещения нейтральной оси ξ на различных ступенях нагружения. Для указанных выше серий наблюдалось незначительное уменьшение высоты сжатой зоны бетона на 7-10%.

Влияние режима нагружения на прочностные и деформативные характеристики шлакощелочных внецентренно сжатых элементов при многократно повторных воздействиях. Значения прочности при однократном нагружении были приняты в качестве эталонной, относительно которой оценивали прочность при повторном нагружении.

По результатам испытаний образцов серий К-1, ..., К-9 установили влияние повторного характера воздействия на особенности повреждения бетона. Характер повреждений бетона во внецентренно сжатых образцах от сжимающих напряжений бетона при действии многократной повторной статической нагрузки зависел от величины задаваемого эксцентриситета и практически не зависел от уровня нагружения и числа циклов. Разрушение внецентренно сжатых шлакощелочных элементов независимо от величины относительного эксцентриситета носило хрупкий характер, при котором происходило отслоение и отпадание защитного слоя с последующим искривлением сжатых стержней. Результаты исследований показали, что повторное нагружение для исследуемых образцов привело к увеличению несущей способности по сравнению с однократным нагружением. Несущая способность в сериях К-1, К-2, К-3, К-4 при числе циклов $n = 2$ увеличивается в зависимости от уровня нагружения на 11,8-14,7% по сравнению с образцами, подверженными монотонно возрастающей нагрузке. С ростом числа циклов (серии К-5, К-6, К-7, К-8) прочность образцов по сравнению с однократным нагружением возрастает на 17,6-30% в зависимости от величины эксцентриситета и уровня нагружения.

Наиболее значимым фактором, существенно воздействующим на относительную малоцикловую прочность конструкций, оказалось количество циклов повторной нагрузки. Повторное нагружение способствует реализации прочностных свойств за счет уплотнения структуры бетона. Фазовый состав продуктов твердения шлакощелочного вяжущего характеризуется преобладанием низкоосновных гидросиликатов натрия, которые обладают высокой сорбционной способностью. Это свойство обеспечивает уплотнение и упрочнение шлакощелочного вяжущего не только во времени, но и при режиме повторного нагружения низких и средних уровней. При вторичном и последующих циклах загрузки отжатой называется все большая часть пластических деформаций. Очевидно, что увеличение прочности будет наблюдаться при уровнях повторных нагружений, не превышающих длительной прочности бетона. Особый интерес при исследовании влияния повторного нагружения на работу конструкций представляет изучение деформативных характеристик бетона. Анализ деформированного состояния внецентренно сжатых коротких элементов при повторном нагружении с числом циклов $n = 2$ позволил выявить общую картину развития деформаций для серий К-1, ..., К-4. Независимо от уровня на-

гружения и места приложения сжимающей силы на втором цикле "нагрузка-разгрузка" происходит значительное уменьшение гистерезисной петли что свидетельствует об отжати пластических деформаций. Физико-механические процессы, происходящие в шлакощелочном бетоне, связаны с увеличением кристаллических сростков цементного камня. Повторное нагружение способствует перераспределению новообразований и некоторому уплотнению материала. Деформации наиболее сжатых фибр зависят от величины относительного эксцентриситета e_0/h и уровня нагружения. Изменение характеристики e_0/h сечения сказывается на максимальных деформациях бетона при разрушении как при однократных, так и при повторных нагрузках. Вторичное нагружение привело к увеличению максимальных деформаций бетона перед разрушением по сравнению с однократным на 2-8% у наиболее сжатой грани сечения и на 6-25% у наиболее удаленной грани от сжимающей силы (серии К-1, К-2). Повышение уровня нагружения, сохраняя общую тенденцию развития деформаций в бетоне, привело к количественному изменению картины деформирования. Так, при вторичном приложении нагрузки максимальные деформации в крайних сжатых фибрах увеличиваются на 4% по сравнению с первым циклом (серии К-3, К-4).

Анализируя характер изменения гистерезисной петли в сечении образцов, было замечено, что амплитуда кривой обращена в сторону оси деформаций, что свидетельствует о более упругой работе бетона в этой зоне.

Наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние оказывает повторное нагружение с числом циклов $n = 30$. Отмечены общие закономерности развития деформаций в сериях К-5, ..., К-9, которые в значительной степени определяются величиной относительного эксцентриситета e_0/h . С увеличением количества циклов относительные деформации бетона увеличивались и на десятом цикле достигали некоторого своего максимального значения. Последующее нагружение привело к незначительному росту деформаций в сжатой зоне. Повышение уровня нагружения способствует увеличению деформаций в сжатых фибрах бетона на 19-25% в зависимости от e_0/h (серии К-7, К-8).

Анализ опытных данных показал, что максимальная величина пластического гистерезиса наблюдается на первом цикле. Каждый последующий этап нагружения приводил к уменьшению площади гистерезисной петли вследствие реализации значительной части пласти-

ческих деформаций бетона. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что при мягком режиме нагружения ($0,4 \leq \rho \leq 0,6$) происходит адаптация бетона к действию повторной нагрузки. Выбранный режим повторного нагружения практически не оказал существенного влияния на работу арматуры.

Опытные данные работы бетона и арматуры во внецентренно сжатых коротких элементах с малыми эксцентриситетами позволили судить об изменении высоты сжатой зоны бетона под действием повторных нагрузок. В опытных образцах всех серий наблюдалось незначительное уменьшение высоты сжатой зоны бетона с ростом числа циклов. К тридцатому циклу значения высоты сжатой зоны бетона увеличивались по отношению к таковым первого цикла на 3-5%. Замечено, что высота сжатой зоны бетона в момент, предшествующий разрушению, не одинакова и зависит только от величины эксцентриситета.

Работа бетона при случайных нагружениях. Во многих практически важных случаях нагрузки, действующие на реальные конструкции, имеют сложный характер и поэтому не могут быть представлены детерминированными функциями. Примерами таких нагрузок являются пульсации ветра, сейсмические воздействия и другие. Для описания таких нагружений используют методы исследований случайных величин и процессов.

Так как практически во всех исследованиях, посвященных изучению малоциклового воздействия на бетон, закон изменения уровня нагружений детерминированный, то актуальным является проведение испытаний при случайных нагружениях. В данной работе такой подход реализован на основе метода статистических испытаний. Технология его применения состоит в следующем: разыгрывая на ЭВМ набор псевдослучайных чисел, моделируется по заданному закону распределения реализация случайной нагрузки как функции числа циклов, после испытания бетонных призм по заданной программе получают реализации параметров напряженно-деформированного состояния бетона. Проводя статистическую обработку полученных реализаций, вычисляют вероятностные характеристики исследуемых параметров.

В данной работе уровень внешнего воздействия считался равномерно распределенным и моделировался по формуле:

$$\eta = a + b \cdot \text{RND}(x), \quad (3)$$

где a - нижняя граница уровня воздействия; b - интервал варьирования; $RND(x)$ - случайное число в интервале $[0; 1]$.
 Принято: $a = 0,4$; $b = 0,5$.

Пример результатов испытаний призм п. данной методике приведен на рис. 1, где показана зависимость $\sigma_b \sim \epsilon_b$ и программа нагружений по верхнему уровню. Нижний уровень на каждом цикле равен нулю. Приведенный рисунок позволяет выполнить анализ влияния истории нагружения на параметры напряженно-деформированного состояния текущего цикла. Если на данном цикле уровень нагружения больше уровня нагружения на предыдущих циклах, то ширина петли гистерезиса значительная, происходит большой рост остаточных деформаций, если же меньше, то ширина петли незначительная, что свидетельствует об откатии пластических деформаций и об упругой работе бетона.

Статистическая обработка результатов испытаний позволила получить аппроксимирующие выражения для построения зависимостей $\sigma - \epsilon$ на каждом цикле нагружения ($n \leq 30$):

$$\bar{\epsilon}_{ост}^n = 49 + 58 \lg(n), \quad (\tau = 0,93); \quad (4)$$

$$\sigma_{n+} = 0,4236n^{0,01962} \cdot (\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{ост}^n)^{0,7984} \cdot e^{-2,017 \cdot 10^{-3} (\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{ост}^n)}, \quad (\tau = 0,92); \quad (5)$$

$$\sigma_{n+} = 0,4768n^{1,4955 \cdot 10^{-1}} \cdot (\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{ост}^{n+1})^{0,6717} \cdot e^{-6,5543 \cdot 10^{-1} (\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{ост}^{n+1})}, \quad (\tau = 0,85); \quad (6)$$

где $\bar{\epsilon} = \epsilon \times 10^5$; $[\sigma] = \text{МПа}$; σ_{n+} - напряжение на n -ом полцикле нагружения; σ_{n+} - то же, разгрузки.

Исследование второй производной функций (5, 6) показало, что функция (5) не имеет точек перегиба и обращена выпуклостью в сторону оси $\bar{\sigma}$. Функция (6) имеет точку перегиба, сначала она обращена выпуклостью в сторону $\bar{\sigma}$, затем в сторону оси $\bar{\epsilon}$. С ростом числа циклов величина модуля упругости возрастает.

Для остаточных деформаций построена корреляционная функция:

$$K(\tau) = 11,16 - 9,33 \cdot 10^{-3} \tau, \quad (7)$$

где $\tau = n_i - n_j$; $\tau \in [0, 30]$.

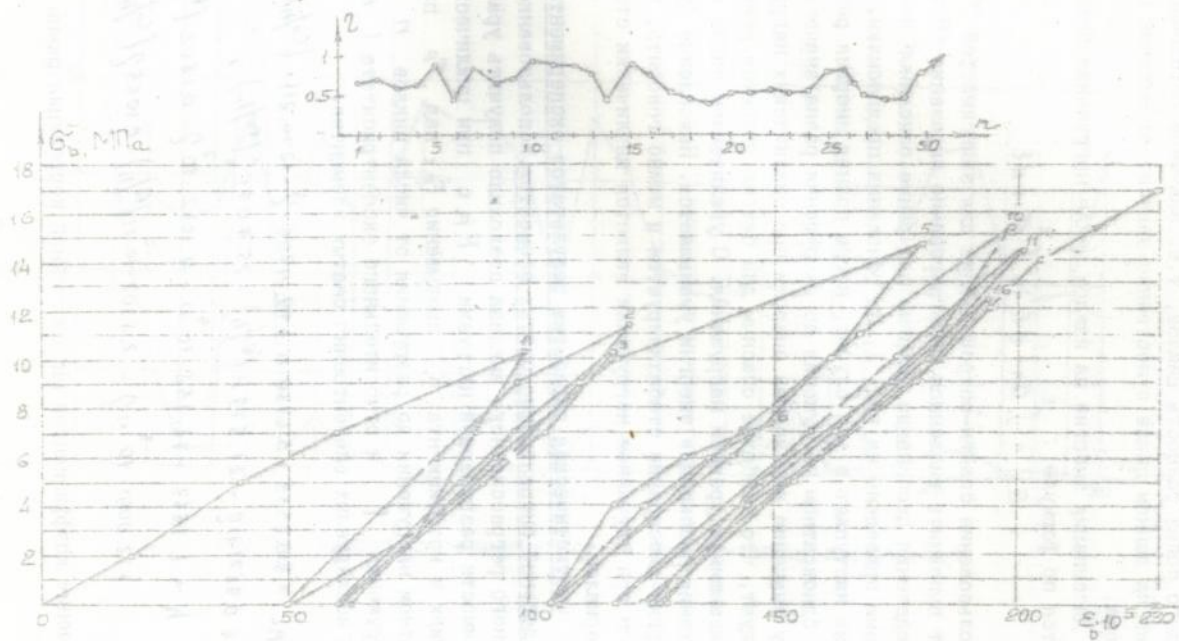


Рис. 1. Деформации бетона при случайных нагрузениях

Анализ этой функции показывает, что она является линейной и незначительно затухает в зависимости от расстояния, представляющего собой разность циклов, т.е. значение остаточных деформаций на данном цикле существенно зависит от истории нагружения бетона.

Диссипация энергии на каждом цикле нагружения бетона определяется по формуле:

$$E_n = \int \sigma_{n+1} d\varepsilon - \int \sigma_n d\varepsilon \quad (8)$$

Использование сплайн-аппроксимаций для зависимостей $\sigma \sim \varepsilon$ позволяет выполнить численное интегрирование выражения (8). Результаты определения диссипации энергии для ранее описанной на рис. 1 приемы приведены на рис. 2. На основании предпосылки, что разрушение наступает в том случае, когда полная энергия разрушения при однократном нагружении до разрушения равна значению суммарному значению диссипации энергии при циклических нагружениях, следует, что наиболее опасным для бетона является режим с увеличивающимся уровнем нагружения. С увеличением числа циклов нагружения диссипация энергии уменьшается. Накопление суммарной энергии диссипации стабилизируется и можно говорить, что данный бетон при случайном нагружении является циклически стабильным материалом.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований внецентренно сжатых элементов. Использование множественного регрессионного анализа позволило получить уравнения зависимости разрушающей нагрузки $F_{p,c}$ при циклических нагружениях и коэффициента K превышения $F_{p,c}$ над F_p при однократном нагружении до разрушения от числа циклов n , уровня нагружения η и относительного эксцентриситета (e_0/h) для исследуемых внецентренно сжатых элементов:

$$F_{p,c} = 910.6533 + 5.6739 \cdot n + 19.4256 \cdot \eta - 1274.211 \cdot (e_0/h) + 0.982111\eta^2 - 21.679n(e_0/h) - 25.7051\eta^2(e_0/h); \quad (9)$$

$$K = 1.1663 + 78.158 \cdot 10^{-4} n + 4.1032 \cdot 10^{-2} \eta - 0.1602 \cdot (e_0/h) + 2.0091 \cdot 10^{-3} \eta^3 - 2.8302 \cdot 10^{-2} n(e_0/h) - 0.1065\eta^2(e_0/h); \quad (10)$$

Значения коэффициентов множественной корреляции равны 0,98 и

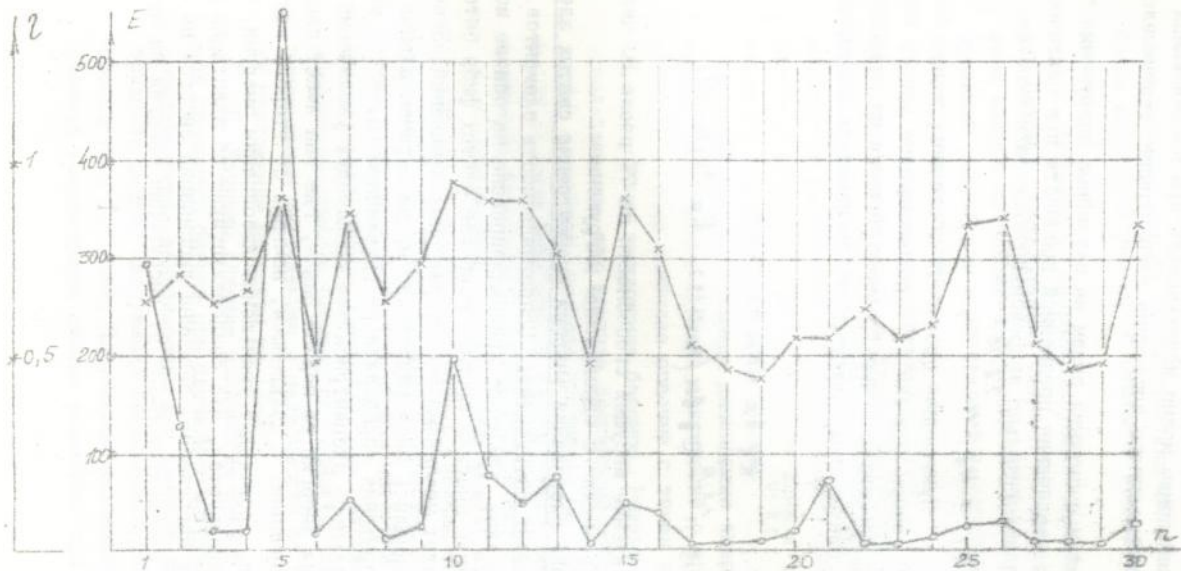


Рис. 2. Диссипация энергии бетона при случайных нагружениях.

0,97 соответственно.

Определение несущей способности внецентренно сжатых элементов при циклических нагружениях. В работе доказано, что результаты испытаний призм можно использовать при исследовании напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов.

По результатам испытания призм на случайные нагружения было установлено, что увеличение призмной прочности при циклических нагружениях удовлетворительно аппроксимируются зависимостью:

$$R_{b,c} = R_b \cdot n^{2,8 \cdot 10^{-2}}, \quad (II)$$

где $R_{b,c} = f(n)$ — призмная прочность после нагружения бетона n циклами. С учетом формулы (II) рекомендуется расчет внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения из шлакощелочного бетона при циклических нагружениях производить по формулам (5, 6):

$$N(n) \leq 0,715 \cdot n^{2,8 \cdot 10^{-2}} R_b \beta x + R_{sc} A_s' - \sigma_s A_s, \quad (12)$$

$$N(n)e \leq 0,715 \cdot n^{2,8 \cdot 10^{-2}} R_b \beta x (h_0 - 0,38x) + R_{sc} A_s' (h_0 - d'). \quad (13)$$

Отмечается увеличение несущей способности на 7% после 30 циклов нагружения по сравнению с однократным нагружением.

Исследование диссипации энергии внецентренно сжатых элементов при циклических нагружениях. Сопротивляемость элементов воздействию циклических нагрузок проанализирована на основе исследований диссипации энергии крайних наиболее сжатых фибр бетона, которая определяет механизмы его структурных изменений. Значения деформаций принимались непосредственно из экспериментальных исследований. Напряжения определяли по выражениям (5, 6). С увеличением относительного эксцентриситета происходит увеличение значений диссипации энергии на первом цикле, где она имеет свое максимальное значение. В дальнейшем, начиная со второго или третьего циклов, происходит уменьшение диссипации энергии, ее значения стабилизируются, что свидетельствует об адаптации конструкций к режиму нагружения. Величина диссипации энергии на последних циклах составляет 8-10% от диссипации энергии на первом цикле.

ВЫСЛЫ

1. Разработана методика исследования напряженно-деформированного состояния бетона при случайных нагрузениях, реализованная с помощью метода статистических испытаний. Данная методика более адекватно учитывает реальные воздействия на бетон и конструкции.

2. Получены аппроксимирующие выражения зависимости $\sigma - \epsilon$ для бетонов, подверженных случайному нагружению. На основе анализа второй производной исследованы точки перегиба функций. Полученные результаты подтверждаются испытаниями бетонов при случайных воздействиях.

3. Анализ корреляционной функции для остаточных деформаций при испытании бетонов на случайное нагружение показывает, что данная функция является линейной, незначительно убывает в зависимости от расстояния, представляющего собой разность циклов. Значения остаточных деформаций на данном цикле существенно зависят от истории нагружения бетона.

4. На основе изучения диссипации энергии бетона при случайных нагружениях сделано заключение о его циклической стабильности. Выявлены наиболее опасные с точки зрения структурных изменений уровни нагружения бетонов. Результаты исследований призм использовались для анализа диссипации энергии бетона внецентренно сжатых элементов, которая составила на тридцатом цикле нагружения 8-10% от этой величины на первом цикле, что свидетельствует об адаптации элементов к режиму нагружения.

5. Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований опытных образцов позволила получить коэффициенты регрессионной модели влияния количества циклов, уровня нагружения и эксцентриситета приложения нагрузки на несущую способность внецентренно сжатых элементов. При малоцикловых нагружениях происходит увеличение несущей способности элементов по сравнению с однократным нагружением в зависимости от величины эксцентриситета приложения нагрузки на 12-30%.

6. Изучено влияние количества циклов на изменение призмной прочности бетона при случайных нагружениях. Предложена аппроксимирующая зависимость. Для данного класса бетона после тридцати циклов нагружения происходило увеличение призмной прочности в 1,1 раза. Полученная зависимость положена в основу расчета внецентренно сжатых элементов при многократно повторных

нагружениях. Алгоритм расчета реализован на ЭВМ.

7. Приращение и накопление деформаций в бетоне и арматуре при малоцикловых нагрузках зависят от интенсивности прикладываемой нагрузки, величины эксцентриситета и возрастает с ростом количества циклов. При этом для шлакощелочных элементов для уровней нагружения $0,4 \leq \sigma_n \leq 0,8$ сохраняется практически линейная связь между напряжениями и деформациями.

8. Напряженно-деформированное состояние внецентренно сжатых элементов при повторных нагрузках в значительной степени определяется величиной относительного эксцентриситета.

9. Отмечено, что при повторных нагружениях в диапазоне $0,4 \leq \sigma_n \leq 0,8$ для внецентренно сжатых элементов происходит адаптация к режиму нагружения, что выражается в переходе к практически упругой работе бетона после некоторого числа циклов. Подтверждением этого служит накопление остаточных деформаций и их постоянный рост с увеличением числа циклов.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Гончаров В.И., Чирва Т.Л., Чирва В.Н., Куран Ш.А. Работа внецентренно сжатых шлакощелочных элементов при действии однократных и повторных нагрузок. - Киев, 1993. - с. - Деп. в УкрНИИТИ, № 855-Ук93.

2. Чирва В.Н., Гончаров В.И., Куран Ш.А. Аналитическое описание напряженно-деформированного состояния сжатых элементов при немногократно повторных нагружениях. - Киев, 1993. - с. - Деп. в УкрНИИТИ, № 856-Ук93.