

критической границы) на второй стадии происходит стабилизация прироста деформаций, т. е. на верхней ступени загрузки деформации увеличиваются на некоторую постоянную величину  $\Delta \epsilon$ .

Для бетонов на основе ОМП характерны те же особенности работы в условиях малоциклового нагружения, что и для традиционных бетонов: при высоких уровнях нагружения на второй стадии происходит стабилизация прироста деформаций, незначительное увеличение уровня нагружения на рост деформаций бетона существенно не влияет; при изменении эксплуатационного уровня на более высокий на протяжении последующих десяти циклов прирост деформаций также стабилизируется; при внезапном увеличении уровня нагрузки деформации бетона растут, однако при возвращении к эксплуатационному уровню они стабилизируются, при этом имеет место т. н. «эффект Баушингера», когда граница ползучести при разгрузке уменьшается под влиянием пластических деформаций, возникших при нагружении.

Однако в процессе проведения экспериментальных исследований было выявлено одно существенное отличие работы бетонов на основе ОМП.

Стабилизация деформаций не наблюдается даже при низких уровнях нагружения, на пятом-шестом циклах происходит стабилизация прироста деформаций, но об упругой работе ОМП-бетона говорить не приходится. Отсутствие роста деформаций характерно лишь для режима нагружения с внезапным увеличением уровня нагружения при возвращении к предыдущему уровню (при этом эффект Баушингера проявляется не так явно, как для традиционного тяжелого бетона).

При этом несущая способность ОМП-бетона при малоцикловых нагрузках не снижается, а может увеличиться до 5 % по сравнению с однократным нагружением. Это связано с тем, что критическая граница (предел верхнего микротрещинообразования) для ОМП-бетона значительно выше, чем для традиционного ( $\eta_{в ОМП} = 0,88 > \eta_{в ТР} = 0,7$ ). Так как значительный прирост пластических деформаций в ОМП-бетонах, как уже отмечалось выше, имеет место в основном при разрушающей нагрузке ( $\eta = 1,0$ ), то развитие деформаций ползучести в процессе малоциклового нагружения не является критическим и не ведет к постепенному разрушению образца, а напротив, способствует стабилизации пластических деформаций и, как следствие, некоторому увеличению несущей способности.

Таким образом, можно сделать вывод о рациональности использования ОМП-бетонов для усиления сжатой зоны изгибаемых конструкций при работе в условиях малоциклового нагружения.

УДК 624.07

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ С ВНЕШНИМ ЛИСТОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ

*С. Д. СЕМЕНЮК, В. Н. МЕДВЕДЕВ, Е. В. КОЖЕМЯКИНА*  
*Белорусско-Российский университет, г. Могилев*

Сталебетонные конструкции применяются в специальном, промышленном и гражданском строительстве, в мостостроении, в машиностроении и других областях строительства. Наиболее распространенными и довольно хорошо исследованными конструкциями с внешним армированием являются трубобетонные, в которых, благодаря преобразованию одноосного напряжённого состояния в трехосное, обеспечивается повышение прочности бетонного ядра и несущей конструкции в целом.

Конструкции с листовой арматурой незаменимы при необходимости металлической гидроизоляции в сооружениях объектов транспортного строительства, атомной энергетики. С их использованием строятся различные подземные сооружения: фундаменты под оборудование, тоннели, резервуары, опускные колодцы, подводные и плавучие сооружения, перекрытия с профилированной листовой и ортотропной арматурой, сооружения АЭС. Большой интерес вызывают сталежелезобетонные конструкции с внешним полосовым армированием, применяемые в виде ригелей, подкрановых балок. При этом используются конструкции с одиночным и двойным армированием полосами, в том числе предварительно напряжённые.

Значительное число работ посвящено изучению конструкций с внешним листовым армированием. Среди них работы Клименко Ф. Е., Воронкова Р. В., Стрелецкого Н. Н., Людковского И. Г., За-

лесова А. С., Чихладзе Э. Д., Скоробогатова С. М., Бочагова В. П., Васильева А. П., Стороженко Л. И., Шагина А. Л., Шмуклера В. С., Фомицы Л. Н., Пустовойтова В. П., Кириленко В. Ф., Молодченко Г. А., Санжаровского Р. С., Бердичевского Г. И., Аншина Л. З., Барабаша В. М., Потера М. Л., Лавсена Р. М., Онга К. С. Лобяка А. В., Берестянской С. Ю., Чернышевой Е. В., Веревицкой М. А. и др.

За последние десятилетия была доказана эффективность внешнего армирования в изгибаемых элементах. Отметим получаемые в этом случае преимущества: сосредоточение рабочей арматуры у внешней грани растянутой зоны бетона приводит к уменьшению высоты сечения и снижению собственного веса конструкции по отношению к железобетонным элементам с многорядным армированием; внешняя листовая арматура при монолитном способе производства может выполнять функции опалубки, подмостей, существенно снижать затраты труда и материалов при производстве монтажных работ; листовая арматура, помимо силовых, может выполнять изоляционные функции при строительстве объектов, к конструкциям которых предъявляются требования непроницаемости для жидкостей, газов и излучений.

Широкое распространение в отечественной и зарубежной практике получили монолитные сталебетонные перекрытия, где в качестве внешней арматуры используются стальные профилированные настилы. Этому способствовала, прежде всего, возможность использования внешней арматуры как несущей опалубки, упрощение крепления коммуникаций и оборудования, монтажа стыков элементов без дополнительных закладных деталей и выступающих частей. Такая конструкция перекрытия позволяет значительно снизить трудозатраты, сократить сроки возведения, уменьшить собственный вес на 30 % по сравнению с обычными железобетонными, а также получить значительный экономический эффект при строительстве высотных зданий.

В многоэтажных общественных и жилых зданиях со стальным каркасом плиты применяют в комбинации с прогонами (фермами) междуэтажных перекрытий. К наиболее известным зданиям, в перекрытиях которых применены сталебетонные плиты, относится одно из самых высоких зданий в мире «Сиерс-Тауэр», высотой 447 м, построенное в Чикаго.

В Чехии разработана и широко применяется универсальная система «VIP» для многоэтажных гражданских и промышленных зданий со стальными каркасами. Междуэтажные перекрытия состоят из прокатных узкополочных или сварных балок пролётами от 2,4 до 12,6 м и включённых в совместную работу с балками сталежелезобетонных плит в виде панелей профилированного настила с уложенным поверх настила монолитным железобетоном. Профилированный настил укладывается на прогоны, после чего, для обеспечения совместной работы, к прогону через стальной лист привариваются цилиндрические вертикальные упоры с головкой. Благодаря применению прогрессивной сварочной технологии с использованием специальных сварочных пистолетов и стандартных упоров достигается высокая производительность труда. Объединение настила с бетоном в пролёте может обеспечиваться рифлениями, выштамповками, вырезами, отгибами, а также привариванием арматурных стержней поперёк гофров к верхней полке профиля. Расчёт монолитного перекрытия с внешним армированием профилированными настилами предлагается сводить к расчёту составной двухслойной балки с упругопластическими составляющими стержнями и упругоподатливыми связями сдвига.

Одним из недостатков элемента плиты с листовой гофрированной арматурой является малая несущая способность и жесткость поперек гофров, вследствие чего плита работает как балочная. Попыткой преодолеть отмеченный недостаток можно считать предложение, в соответствии с которым для повышения жесткости и прочности плиты в поперечном направлении рекомендуется перед бетонированием пропускать стержневую арматуру периодического профиля через отверстия в стенке настила, что способствует не только повышению жесткости в "слабом" направлении, но также улучшает объединение бетона с настилом.

В обычных и предварительно напряженных балочных плитах стальной лист находится в условиях двухосного растяжения, благодаря чему повышается его предел текучести и снижается деформативность. Экспериментальные исследования показали, что листовое армирование позволяет увеличить несущую способность на 30–40 % в балочных плитах с обычной и напрягаемой арматурой по сравнению с аналогичными железобетонными плитами.

В сталебетонных конструкциях сцеплению листовой арматуры с бетоном по длине контакта придаётся первостепенное значение, так как надёжная связь является единственной гарантией экс-

платационной пригодности конструкций. В противном случае, как показывают исследования, несущая способность ограничивается прочностью объединения листа с бетоном. В настоящее время существуют прогрессивные сварочные технологии, широко применяются в строительстве эффективные синтетические клеящие средства, а также находятся новые конструктивные решения элементов с внешним листовым армированием, в том числе плит с плоской листовой арматурой.

УДК 624.072.21.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕПЕННОГО ЗАКОНА БЮЛЬФИНГЕРА

Е. А. СИГАЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В предлагаемом расчете неоднородное упругое основание моделируется совокупностью упругих слоев (УС) конечной ширины с переменным модулем деформации. Закон нелинейно-упругого деформирования основания описывается математически разными функциональными зависимостями, а именно: гиперболический тангенс и степенная функция. Коэффициент Пуассона каждого слоя принимается постоянным.

В рассматриваемой работе используется *вариационно-разностный подход* (ВРП) к решению контактных задач нелинейной теории упругости (плоская деформация), который имеет важность практического применения в расчетах балочных плит на упругом основании. ВРП был предложен и получил дальнейшую апробацию в работах Босакова С. В., Козуновой О. В.

*Постановка задачи:* рассматривается балочная плита шириной  $2l$  на упругом физически нелинейном слоистом основании под действием произвольной нагрузки. На контакте плиты с упругим основанием возникают только нормальные реактивные давления, силами трения пренебрегаем. Для плиты справедливы гипотезы теории изгиба.

При расчете слоистая упругая среда заменяется прямоугольной расчетной областью. Основание аппроксимируется симметричной разбивочной сеткой с постоянным шагом по осям:  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ . В результате получено 203  $i$ -тых узловых и 168  $j$ -тых сеточных ячеек.

За *неизвестные* принимаются:  $u_i(x), v_i(y)$  – компоненты вектора перемещения  $i$ -той узловой точки основания;  $p_y^{(i)}(x, y)$  – реактивные давления в зоне контакта балочной плиты с основанием.

*Граничные условия задачи:* на границах принятой расчетной области перемещения  $u = 0, v = 0$ ; в контактной зоне справедливо равенство осадок основания прогибам плиты.

*Требуется* определить перемещения, напряжения в упругом основании и его осадки, распределение реактивных давлений в контактной зоне балочной плиты с основанием, внутренние усилия в сечениях плиты.

В силу нелинейности решаемой задачи используется метод упругих решений в области малых упругопластических деформаций, который предполагает итерационный процесс. При каждой итерации модуль деформации центра  $j$ -той сеточной ячейки изменяется, и при вычислениях используется переменный модуль деформации (касательный и *секущий*) в сравнении.

Согласно вариационному принципу Лагранжа, при нагружении плиты на упругом основании статической нагрузкой, ее полная потенциальная энергия в состоянии равновесия принимает минимальное значение. Величина функционала полной потенциальной энергии плиты на упругом основании состоит из трех слагаемых: функционала энергии деформаций упругого основания, функционала энергии деформаций плиты и потенциала работы внешней нагрузки, и определяется формулой  $\Xi = U_f + \Omega_b + \Pi$ .

*Решение контактной задачи* строится в перемещениях и реализуется методом конечных разностей (МКР), то есть заменой дифференциальных уравнений линейными конечно-разностными соотношениями. Энергия деформаций упругого основания получается суммированием по объему основания энергий деформаций прямоугольных участков для каждой ячейки МКР. Энергия изгиба