

УДК 624.012

к.т.н. Каранетян С. Х.,
к.т.н. Псюк В. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

К ПОСТРОЕНИЮ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ИЗ ОПЫТА НА ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК ПРИ ОДНОКРАТНЫХ И ПОВТОРНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований по установлению связи между напряжениями и деформациями в условиях неоднородного сжатия бетона с использованием дифференциального метода Фере.

Ключевые слова: железобетонная стойка, внецентренное сжатие, многократно повторные нагрузки, деформативность, дифференциальный метод.

Актуальность проблемы. Допустимость использования диаграмм деформирования бетона « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », полученных из отдельных опытов при центральном сжатии и растяжении к расчёту изгибаемых или внецентренно сжатых железобетонных элементов, где обе деформации происходят одновременно и в одном образце, до сих пор поддаётся сомнению [5, 3]. Следовательно, при подобного рода воздействиях между напряжениями и деформациями должна быть принципиально иная связь, чем при осевом сжатии. Для этого необходимо одновременно с испытаниями на центральное сжатие и растяжение получить диаграмму состояния бетона « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » непосредственно по результатам испытания изгибаемых или внецентренно сжатых элементов [1, 2, 6].

Для построения таких диаграмм, как следует из работ [1, 2, 4, 6, 8], наиболее приемлем дифференциальный метод Фере (Ferret), позволяющий установить закон деформаций бетона из опыта на изгиб. В дальнейшем этот приём разработан для железобетонной балки на изгиб с одиночным и двойным армированием для случая однократного статического нагружения [5–7]. Применимость указанного метода, модифицированного для случая многократно повторных нагружений при изгибе, экспериментально доказана в работе [4].

Логическим продолжением вышеприведённых работ следует считать исследование и обоснование возможности использования вышеуказанного метода и для внецентренно сжатых элементов. Поэтому с целью установления связи между напряжениями и деформациями бетона из опыта на внецентренное сжатие в [3] было выполнено развитие метода Фере.

Постановка задачи. Задачей исследований является построение диаграмм деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона указанным методом для железобетонных стоек как при однократном, так и при повторных нагружениях.

Изложение материала и его результаты. Для получения указанных диаграмм используем следующие уравнения, полученные в рамках развития метода Фере:

$$\sigma_{1,i} = \left(\frac{dp}{d\varepsilon_1} \right) \left\{ \varepsilon_{2,i} + \varepsilon_{P,i} + p_i \left(\frac{de}{dp} \right)_i \times \right. \\ \times \frac{\varepsilon_{2,i} + \varepsilon_{P,i}}{e_i} + \left(\frac{d\varepsilon_P}{dp} \right)_i - \frac{E_s \mu}{e_i} \times \\ \times \left[\left(\frac{dQ_2}{dp} \right)_i - \left(\frac{dP_2}{dp} \right)_i \varepsilon_{2,i} + \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{dQ_1}{dp} \right)_i + \left(\frac{dP_1}{dp} \right)_i \varepsilon_{2,i} \right] \right\}; \quad (1)$$

$$\sigma_{2,i} = \left(\frac{dp}{d\varepsilon_2} \right) \left\{ \varepsilon_{1,i} + \varepsilon_{P,i} + p_i \left(\frac{de}{dp} \right)_i \times \right. \\ \times \frac{\varepsilon_{1,i} + \varepsilon_{P,i}}{e_i} + \left(\frac{d\varepsilon_P}{dp} \right) - \frac{E_s \mu}{e_i} \times \\ \times \left[\left(\frac{dQ_2}{dp} \right)_i - \left(\frac{dP_2}{dp} \right)_i \varepsilon_{1,i} + \right. \\ \left. + \left(\frac{dQ_1}{dp} \right)_i + \left(\frac{dP_1}{dp} \right)_i \varepsilon_{1,i} \right] \left. \right\}, \quad (2)$$

где $\sigma_{1,i}$ и $\sigma_{2,i}$ — фибровые напряжения сжатия и растяжения в бетоне стойки на i -м этапе нагружения; $\varepsilon_{1,i}$, $\varepsilon_{2,i}$ — полные фибровые деформации бетона стойки с учётом начальных и остаточных; $\varepsilon_{P,i}$ — деформация волокна, имеющего ординату u_P ; $e_i = \varepsilon_{1,i} + \varepsilon_{2,i}$; $p_i = P_i/bh$ — приведённая сжимающая сила; P_1 , P_2 , Q_1 и Q_2 — функции, зависящие от $\varepsilon_{1,i}$ и $\varepsilon_{2,i}$.

Построение диаграмм деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона для стоек. В качестве исходной информации использовались экспериментальные данные, полученные по результатам испытаний железобетонных внецентренно сжатых стоек трёх серий: С-I, С-II и С-III [9]. Полученные зависимости между напряжениями и деформациями в условиях неоднородного сжатия бетона как при однократном (серия С-I), так и при многократно повторных нагружениях стоек (серии С-II и С-III) показаны на рисунках 1, 2 и 3.

Для стоек серий С-II и С-III приведены диаграммы для первого и последующих циклов нагружений.

Кроме того, для сравнения приведены кривые состояния стоек « $P - \varepsilon_{1,2}$ » (сжимающая сила — фибровые деформации на сжатой и растянутой гранях сечения) (рис. 4) и « $P - \varepsilon_1(n)$ » (сжимающая сила — фибровые деформации на сжатой грани сечения в зависимости от количества циклов n) (рис. 5 и 6), полученные в опытах [6, 9].

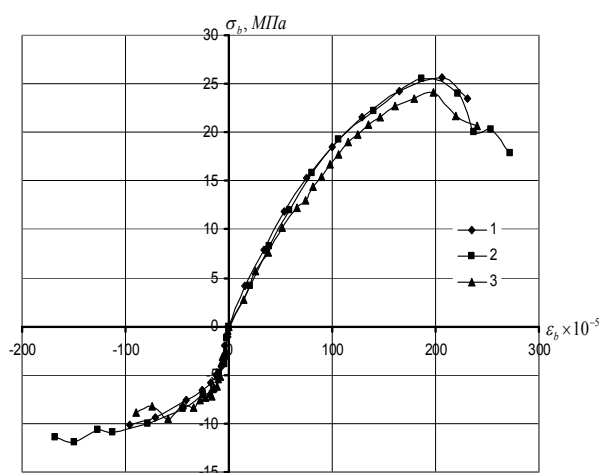


Рисунок 1 Диаграммы деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона стоек серии С-I: 1, 2, 3 — соответственно для стоек С-I-1, С-I-2, С-I-3

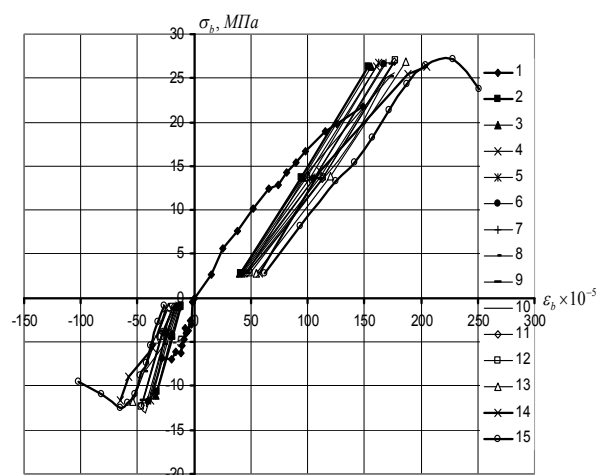


Рисунок 2 Диаграмма циклического деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » стойки С-II-1 при повторных нагружениях: 1 — нагрузка 1-го цикла; 2–14 — нагрузки 2–14-го циклов соответственно; 15 — нагрузка 15-го цикла

При проведении экспериментальных исследований изучали особенности деформирования и исчерпания несущей способности, а также изменения прочностных и деформативных характеристик бетона в стойках при многократно повторных нагружениях.

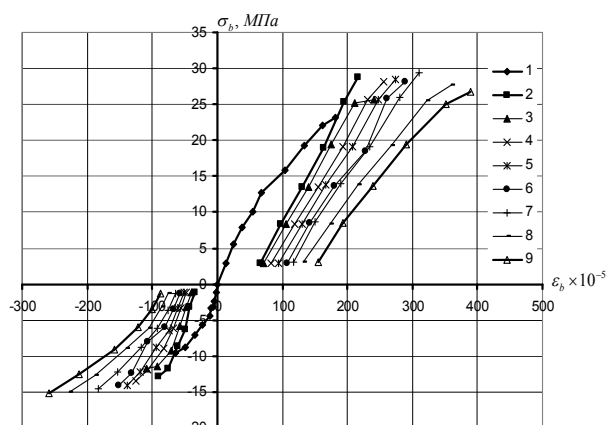


Рисунок 3 Диаграмма циклического деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » стойки С-III-1 при повторных нагружениях: 1— нагрузка 1-го цикла; 2–7 — нагрузки 11, 21, 41, 61, 81, 101, 111-го циклов соответственно; 9 — нагрузка 121-го (последнего) цикла

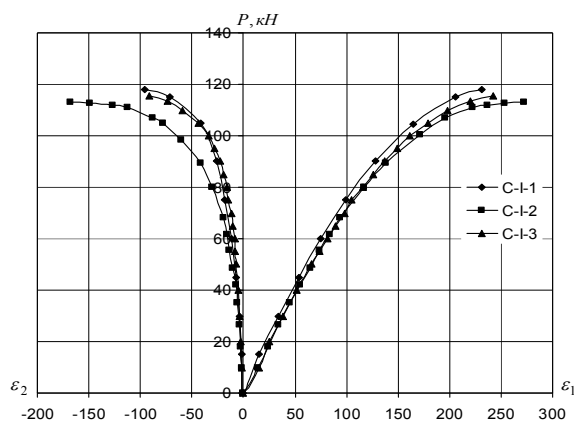


Рисунок 4 Диаграммы деформирования « $P - \varepsilon_{1,2}$ » стоек серии С-I

Сравнение диаграмм при однократных нагружениях (серия С-I) позволило выявить отличие « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » от кривых состояния стоек « $P - \varepsilon_{1,2}$ ». Характерной особенностью и отличием указанных диаграмм является наличие на « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » ниспадающих участков с координатами напряжений $\sigma_{b,\min} < \sigma_{b,\max}$ и соответствующих им деформаций на сжатых фибрах стоек $\varepsilon_{b,\max} = \varepsilon_{1,\max} > \varepsilon_{bR}$ ($\varepsilon_{1,\max}$ — абсцисса точек на кривых « $P - \varepsilon_1$ », в которых

$P = P_{cr}$). При этом, как показали вычисления, напряжения в вершинах диаграмм деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », достигают максимальных значений $\sigma_{b,\max}$ при деформациях $\varepsilon_b < \varepsilon_{1,\max}$ и соответствующих значениях нагрузок, равных $P < P_{cr}$ или в среднем по серии $P(\sigma_{b,\max}) \approx 0,95P_{cr}$.

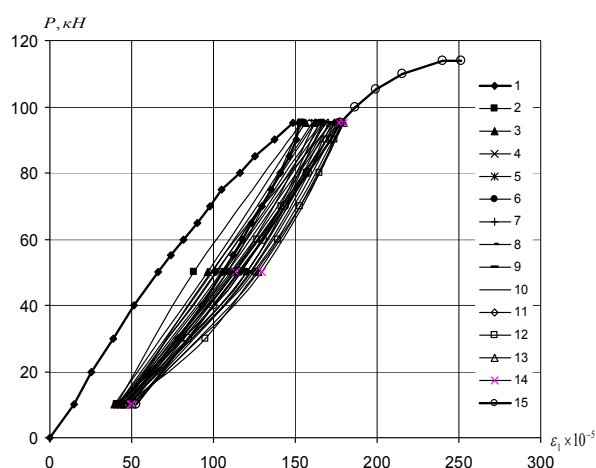


Рисунок 5 Характерная диаграмма деформирования « $P - \varepsilon_1(n)$ » стойки С-II-1 при повторных нагружениях: 1 — нагрузка 1-го цикла; 2–14 — нагрузки 2–14-го циклов соответственно; 15 — нагрузка 15-го цикла

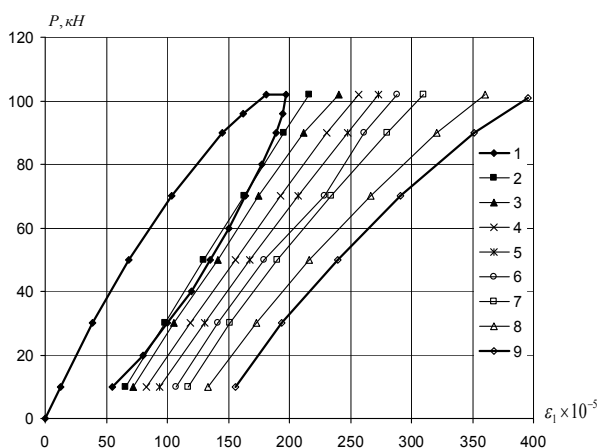


Рисунок 6 Диаграмма циклического деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » стойки С-II-1 при повторных нагружениях: 1 — нагрузка 1-го цикла; 2–14 — нагрузки 2–14-го циклов соответственно; 15 — нагрузка 15-го цикла

Это даёт основание предположить, что в процессе нагружения стоек достижение крайними фибрами сжатого бетона максимальных напряжений $\sigma_{b,\max}$ происходит раньше достижения нагрузкой значения P_{cx} . Дальнейшее уменьшение напряжений при увеличивающейся нагрузке связано с реализацией нисходящей ветви диаграммы бетона стоек « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », но при более интенсивном росте деформаций. В момент потери несущей способности стоек (при нагрузке $P = P_{cr}$) значения указанных напряжений, соответствующих концам нисходящих ветвей диаграммы деформирования бетона в среднем составили $\sigma_{b,\min} \approx 0,87\sigma_{b,\max}$. Таким образом, достижение максимумов кривых « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » и « $P - \varepsilon_1$ » происходило практически одновременно (расхождение значений не более 5 %).

Отмеченное выше наличие ниспадающих участков на диаграммах « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона внецентренно сжатых стоек подтверждается опытами других исследователей и, как показано в работе [10], является необходимым условием, которому должна отвечать диаграмма « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » материала, чтобы кривые состояния изгибаемых и внецентренно сжатых элементов при деформациях крайних фибр $\varepsilon_b > \varepsilon_{bR}$ имели максимум, то есть точку, соответствующую потере устойчивости. Что же касается изломов на ниспадающих ветвях диаграмм деформирования стоек, то они, возможно, связаны с погрешностями эксперимента и заменой дифференциала в уравнениях (1) и (2) конечными приращениями.

Анализ диаграмм циклического деформирования бетона « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » повторно нагружаемых стоек (рис. 2 и 3) позволил сделать вывод, что восходящий участок диаграммы вследствие постепенного накопления пластических (остаточных) деформаций в пределах заданных нагрузений выпрямляется и бетон сжатой зоны сечения ведёт себя как упругий материал.

При этом угол наклона «прямых» « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » к оси абсцисс, начиная со второго цикла, постепенно уменьшается, что является свидетельством снижения начального модуля упругости бетона (жёсткостных характеристик сечений) стоек. На втором цикле нагружения угол наклона становится равным углу наклона касательной к кривой первого цикла, а затем, постепенно, от цикла к циклу, происходит его дальнейшее уменьшение. Из рисунков видно, что при постоянной величине максимального усилия циклов повторного нагружения значения фибровых напряжений, достигаемые в конце полуциклов, увеличиваются сразу после первого цикла и стабилизируются, начиная со второго цикла (наступление приспособляемости).

Данное явление можно объяснить перераспределением усилий между сжатым бетоном и растянутой арматурой вследствие развития пластических деформаций, приводящих к увеличению эксцентриситета приложения P_{\max}^{cyc} и циклического упрочнения бетона, связанного с уплотнением его структуры. При этом увеличение значения напряжений, наблюдаемое при переходе с первого на второй цикл, связано с величиной остаточного прогиба после первого цикла, который является дополнительным эксцентриситетом второго цикла.

На рисунке 7 приведено сопоставление диаграмм деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » внецентренно сжатых однократно и повторно нагружаемых стоек (со смещением последних на начало координат) с диаграммами центрально сжатых бетонных призм проектной прочности.

Как видно из рисунка, приведённые кривые « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » имеют характерное очертание и в целом достаточно близки между собой. Следует также заметить, что верхние точки (напряжения в вершинах диаграмм деформирования) кривых стоек практически не выходят за пределы, ограниченные кривой призмы. Это даёт основание заклю-

читать, что диаграмма деформирования бетона при однократном центральном нагружении призм является огибающей для « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона стоек при однократных и повторных нагружениях мягкого режима.

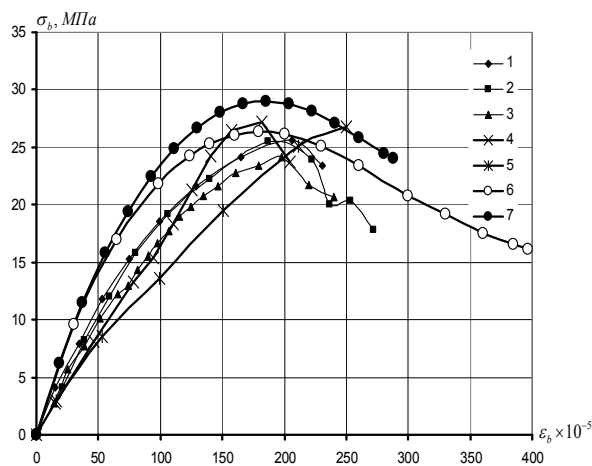


Рисунок 7 Диаграммы деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона стоек и призм: 1–3 — стойки

С-I-1, С-I-2, С-I-3 при однократных нагружениях; 4, 5 — стойки С-II-1, С-III-1 после действия повторных нагружений со смещением на начало координат;

6 и 7 — призмы прочностью $R_b = 26,4$ МПа и $R_b = 29$ МПа

Библиографический список

1. Бачинский, В. Я. Связь между напряжениями и деформациями бетона при кратковременном неоднородном сжатии [Текст] / В. Я. Бачинский, А. Н. Бамбура, С. С. Ватагин // Бетон и железобетон. — 1984. — № 10. — С. 18–19.
2. Бамбура, А. Н. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе [Текст] / А. Н. Бамбура, А. Б. Гурковский // Сборник научных трудов НДБК. — К., 2003. — Вып. 59. Книга 1. — С. 121–130.
3. Карпетян, С. Х. Развитие метода Фере для нахождения закона деформаций бетона из опыта на внецентренное сжатие при однократных и многократно повторных нагружениях [Текст] / С. Х. Карпетян // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2008. — Вып. 26. — С. 287–296.
4. Подобенко, Т. Н. Напряжённо-деформированное состояние железобетонных изгибаемых элементов при кратковременных повторных нагружениях [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Подобенко Татьяна Николаевна. — К. : НИИСК, 1991. — 17 с.
5. Столяров, Я. В. Введение в теорию железобетона [Текст] / Я. В. Столяров. — М. : Стройиздат Наркомстроя, 1941. — 446 с.
6. Карпетян, С. Х. Прочность и устойчивость внецентренно сжатых стержней в условиях многократно повторных нагружений [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Карпетян Смбат Хачатурович. — К. : НИИСК, 2009. — 20 с.

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные зависимости дифференциального метода позволили построить диаграммы деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » сжатого бетона непосредственно по результатам испытаний железобетонных внецентренно сжатых стоек в условиях однократных и многократно повторных нагружений и выявить следующее:

– для исследуемых железобетонных внецентренно сжатых стоек достижение максимумов кривых « $P - \varepsilon_1$ » и « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » в процессе однократного кратковременного нагружения происходит практически одновременно, при этом достижение $\sigma_b = \sigma_{b, \max}$ несколько опережает достижение $P = P_{\max}$ на кривой « $P - \varepsilon_1$ »;

– результаты сопоставления параметров диаграмм « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », полученных при однократном внецентренном сжатии железобетонных стоек и центральном сжатии бетонных призм, свидетельствуют об их практическом совпадении, что говорит о возможности использования последних для расчёта железобетонных стержневых элементов.

7. Методические рекомендации по определению параметров диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » бетона при кратковременном сжатии [Текст] / В. Я. Бачинский, А. Н. Бамбура и др. — К., 1985. — 16 с.

8. Ватагин, С. С. Связь между напряжениями и деформациями бетона в сжатой зоне ж/б элементов. Интегральная оценка работы растянутого бетона [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / С. С. Ватагин. — К. : НИИСК, 1987. — 19 с.

9. Карапетян, С. Х. Результаты экспериментальных исследований влияния многократно повторных нагрузжений на несущую способность внецентренно сжатых стоек [Текст] / С. Х. Карапетян, А. И. Давиденко, А. П. Иванов, В. В. Псюк // Сборник научных трудов НДІБК. — К., 2005. — Том 1. — Вып. 62. — С. 131–136.

10. Бамбура, А. М. Про втрату стійкості позацентрово стиснутих елементів з пружно-пластичного матеріалу [Текст] / А. М. Бамбура // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : збірник наукових праць. — Львів : Каменяр, 2002. — Вып. 5. — С. 213–218.

© Карапетян С. Х.

© Псюк В. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ПГСиА
ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Хвортовой М. Ю.,
к.т.н., доц., зав. каф. АПиИГ ДонГТУ Бондарчуком В. В.*

Статья поступила в редакцию 28.02.20.

**к.т.н. Карапетян С. Х., к.т.н. Псюк В. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
ДО ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ З ДОСЛІДУ
НА ПОЗАЦЕНТРОВЕ СТИСНЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТОЯКІВ
ПРИ ОДНОРАЗОВИХ ТА ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

Наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень зі встановлення зв'язку між напруженнями і деформациями в умовах неоднорідного стиснення бетону з використанням диференційного методу Фере.

Ключові слова: залізобетонний стаяк, позацентрове стиснення, небагаторазове повторне навантаження, деформативність, диференційний метод.

**PhD in Engineering Karapetyan S. Kh., PhD in Engineering Psiuk V. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)
TO CONSTRUCT DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMATION FROM THE
EXPERIENCE OF THE OFF-CENTER COMPRESSION OF REINFORCED CONCRETE
PROPS UNDER SINGLE AND REPEATED LOADS**

There have been given the results of experimental and theoretical studies on connection between stresses and deformations in conditions of non-uniform concrete compression using the differential Fere method.

Key words: reinforced concrete prop, off-center compression, intermittent load, deformability, differential method.