

Academia. Архитектура и строительство, № 1, стр. 166–170.
Academia. Architecture and Construction, no. 1, pp. 166–170.

Исследования и теория
Научная статья
УДК 691.542
DOI: 10.22337/2077-9038-2024-1-166-170

Эффективность сочетания компьютерных методов моделирования строительных конструкций и принципов классического анализа

Крылов Сергей Борисович (Москва). Доктор технических наук. Лаборатория механики железобетона Научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института бетона и железобетона АО «НИЦ «Строительство» (Russia, 109428, Москва, 2-я Институтская ул., 6, корп. 5. НИИЖБ им. А.А. Гвоздева). Эл. почта: niizhb_lab8@mail.ru

Корнюшина Марина Петровна, Козлов Глеб Михайлович, Калмакова Полина Сергеевна (Москва). Лаборатория механики железобетона Научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института бетона и железобетона АО «НИЦ «Строительство» (Russia, 109428, Москва, 2-я Институтская ул., 6, корп. 5. НИИЖБ им. А.А. Гвоздева). Эл. почта: niizhb_lab8@mail.ru

Аннотация. Опыт расчётов строительных конструкций показывает, что применение моделей материалов, заложенных в программных комплексах, не всегда позволяет получить правильное решение инженерной задачи. В статье приводится несколько примеров, когда наилучший результат достигается при сочетании компьютерного моделирования с принципами, лежащими в основе аналитических расчётов.

Ключевые слова: бетон, моделирование, деформирование

Для цитирования. Крылов С.Б., Корнюшина М.П., Козлов Г.М., Калмакова П.С. Эффективность сочетания компьютерных методов моделирования строительных конструкций и принципов классического анализа // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 1. – С. 166–170. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-1-166-170.

Effectiveness of Combining Computer Methods of Modelling Building Structures and Principles of Classical Analysis

Krylov Sergey B. (Moscow). Doctor of Sciences of Technology. Laboratory of reinforced concrete mechanics of the Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete of the JSC "National Research Center "Construction" (6, build. 5, 2nd Institutskaya, Moscow, 109428, Russia. NIIZHB named after A.A. Gvozdev). E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Kornyushina Marina P., Kozlov Gleb M., Kalmakova Polina S. (Moscow). Laboratory of reinforced concrete mechanics of the Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete of the JSC "National Research Center "Construction" (6, build. 5, 2nd Institutskaya, Moscow, 109428, Russia. NIIZHB named after A.A. Gvozdev). E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Abstract. The experience of calculating building structures shows that the use of material models embedded in software packages does not always allow you to get correct solution to an engineering problem. The article provides several examples where the best result is achieved by combining computer modeling with the principles underlying analytical calculations.

Keywords: concrete, modelling, deformation

Статья написана по материалам доклада на VIII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Россия, Тамбов, 17–21 мая 2023 года

© Крылов С.Б., Корнюшина М.П., Козлов Г.М., Калмакова П.С., 2024.

For citation. Krylov S.B., Korniyushina M.P., Kozlov G.M., Kalmakova P.S. Effectiveness of Combining Computer Methods of Modelling Building Structures and Principles of Classical Analysis. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2024, no. 1, pp. 166–170, doi: 10.22337/2077-9038-2024-1-166-170.

Введение

В настоящее время наблюдается спад интереса к классическим методам анализа работы и состояния конструкций. Практически все расчёты выполняются на компьютерах. При этом, как правило, результат компьютерного расчёта принимается проектировщиком как абсолютно точный. В действительности, при всём удобстве и информативности, численные результаты являются всего лишь одной из возможных оценок состояния конструкции, лишь некоторым приближением. Одной из причин погрешностей при компьютерных расчётах железобетонных конструкций и их узлов, является недостаточная развитость моделей материалов. При непосредственном использовании заложенных в программных комплексах библиотек конечных элементов в ряде случаев не удаётся получить правильное решение задачи. В этих случаях полезно обратиться к принципам, лежащим в основе аналитических методов расчётов и попытаться использовать такой принцип в численной модели. В данной работе рассматривается несколько примеров использования принципов аналитических расчётов совместно с численным анализом конструкций.

Численное моделирование разрушения образцов бетона

Одним из классов задач, в которых успешно сочетаются компьютерные расчёты и принципы, используемые в аналитических методах, является численное моделирование разрушения образцов материалов.

При численном моделировании бетонных кубов и призм для теоретического подтверждения масштабных коэффициентов для образцов разного размера и коэффициентов для перехода от кубиковой прочности к призмной неожиданно пришлось столкнуться с изучением вопросов устойчивости деформирования материала и применением для этого принципов теории устойчивости Ляпунова [1]. В рамках данного исследования были созданы расчётные схемы кубов и призм из нелинейно работающего бетона в программном комплексе ATENA. В теории бетона известно, что кубиковая прочность отличается от призмной, также разрушающие напряжения будут отличаться для кубов разных размеров. В настоящее время есть опытные данные, указывающие, что для новых видов бетонов величины переходных коэффициентов могут отличаться от нормируемых значений. В связи с этим было выполнено численное моделирование процесса деформирования и разрушения бетонных кубов и призм разных размеров.

Обзор литературы показал, что, как ни странно, задача корректного численного моделирования деформирования бетонного куба при испытаниях является чрезвычайно слож-

ной для любого программного комплекса. Известно, что на результат испытаний существенно влияет взаимодействие бетонных образцов с пластинами пресса. Первоначально была сделана попытка смоделировать взаимодействие пресса и бетона с помощью контактных элементов. Но такой подход не позволил получить положительные результаты. Поэтому при окончательных расчётах данное взаимодействие моделировалось с помощью введения в расчётные модели упругих вставок в местах контакта образца и пластин пресса. Трение между образцом и пластиной пресса моделировалось с помощью подбора модуля упругости вставки при крайне низком коэффициенте Пуассона. В свою очередь, модуль упругости вставки подбирался из условия соответствия разрушающей нагрузки нормируемой величине для куба со стандартной длиной ребра 150 мм.

Эти же параметры использовались для образцов других размеров. Моделирование трения при этом обеспечивалось воздействием поперечных деформаций бетонного массива на упругую вставку.

При выполнении расчётов пришлось столкнуться со сложностями моделирования работы материала при приближении к предельной нагрузке. В качестве нагрузки использовались вынужденные перемещения, вычислялось напряжённо-деформированное состояние. В том числе вычислялись реактивные напряжения на опорных гранях, приведённые на графиках ниже (рис. 1, 2).

Результаты, соответствующие известным опытным данным, удавалось получить при сильном уменьшении шагов нагружения (около 0,2% от ожидаемой разрушающей деформации). В противном случае нарушалась сходимость результатов, возникали большие погрешности, и напряжённо-деформированное состояние образца получалось явно ошибочным. Исследование показало, что это связано с недостаточной разработанностью нелинейных моделей материалов, используемых программными комплексами (причём, не только данного, с помощью которого выполнялись вычисления). Бетон является в достаточной степени неоднородным материалом, в то время как численная модель исходит из идеально однородной среды, что и является источником погрешностей при вычислениях. Одним из способов преодоления этого несоответствия, может быть непосредственное моделирование неоднородностей в бетоне. Однако в данном случае было решено применить другой подход.

Неоднородности в бетоне создают возмущения напряжённого состояния материала. С физической точки зрения, деформирование конструкции в состоянии, близком к разрушению, становится неустойчивым. Поэтому было сделано предположение, что для получения достоверного результата необходимо ис-

следовать устойчивость деформирования материала в пластическом состоянии. Для этого было решено использовать принцип, заложенный в теорию устойчивости Ляпунова. Применительно к данной численной задаче было задано малое возмущающее воздействие в виде бокового растягивающего напряжения. Его величина подбиралась такой, чтобы на последнем ожидаемом шаге величина возмущающей нагрузки не превышала 0,1 от расчётного сопротивления бетона на растяжение. Даже при увеличении шага нагружения на порядок, вычислительный процесс проходил устойчиво. Численно было зафиксировано разрушение образца по появлению ниспадающего участка на графике деформирования. Кроме того, такое применение одного из основных положений теории устойчивости позволило численно подтвердить переходные и масштабные коэффициенты для образцов разных размеров и форм.

На рисунках 1 и 2 ниже показано сравнение поведения численной модели 1/4 образца-куба размерами 150×150×150 мм без возмущающей нагрузки и с нагрузкой, создающей возмущение, при одинаковых параметрах нелинейного расчёта. Сравнение данных на этих рисунках показывает, что до момента достижения наибольших напряжений обе численные

модели деформируются почти одинаково. При дальнейшем деформировании их поведение сильно различается. Так, без приложения возмущающей нагрузки деформирование численной модели бетона продолжается практически неограниченно, разрушение расчётной программой не фиксируется. В то же время приложение возмущающего воздействия делает процесс деформирования более приближенным к реальности. Программа фиксирует разрушение образца с отстрелом бетона с оставшейся вычислительной частью. Предельные относительные деформации при наибольших напряжениях, усреднённые по высоте образца, составляют 0,005. Это превышает предельные нормируемые относительные деформации бетона при одноосном напряжённом состоянии. Но с учётом стеснения деформаций при контакте кубика с пластинами прессы такой результат следует признать достоверным. Разрушение образца происходит при нагрузке, соответствующей опытным данным. Относительные деформации в момент разрушения составляют 0,02, что хорошо коррелирует с поведением реальных образцов при испытаниях. Таким образом, результаты численного моделирования при таком подходе получаются вполне достоверными, а поведение модели вполне соответствует реальным образцам.

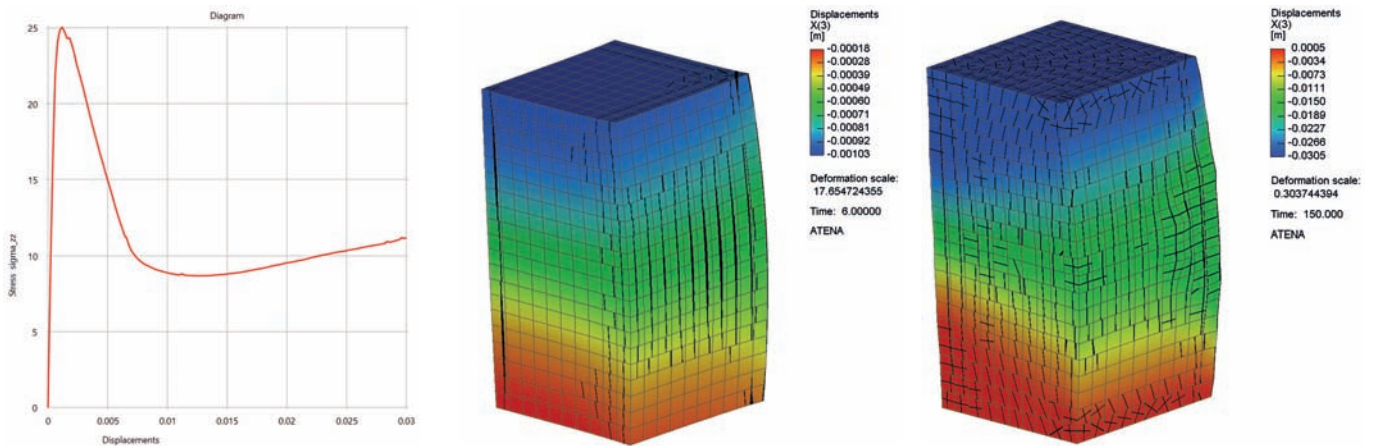


Рис. 1. График деформирования образца. Также показаны вертикальные перемещения при наибольших напряжениях и на последнем шаге нагружения без моделирования возмущения (показана 1/4 образца)

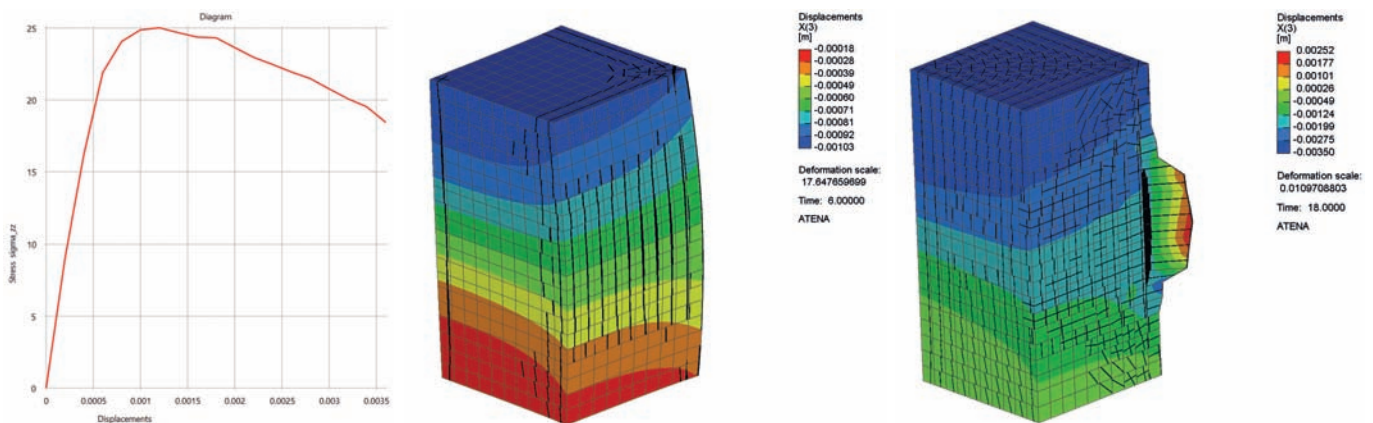


Рис. 2. График деформирования образца. Также показаны вертикальные перемещения при наибольших напряжениях и разрушение с отстрелом бетона образца-куба при моделировании возмущения поля напряжений вследствие неоднородности бетона (показана 1/4 образца)

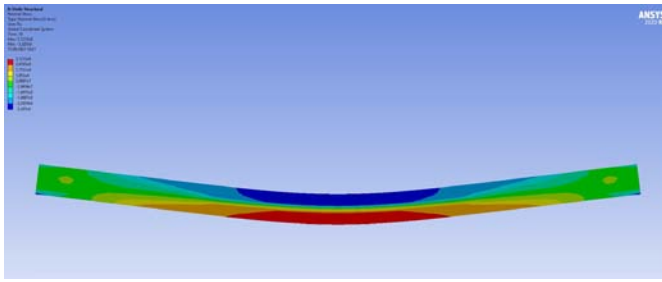


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений в балке при максимальной нагрузке.

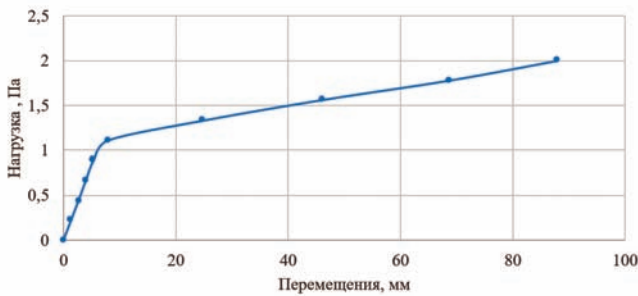


Рис. 4. Величина прогиба стальной балки в зависимости от нагрузки

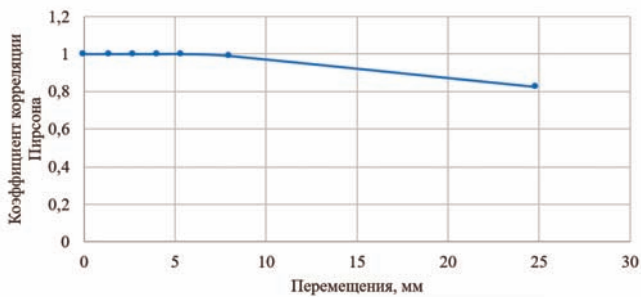


Рис. 5. Коэффициент корреляции Пирсона при разных величинах прогиба

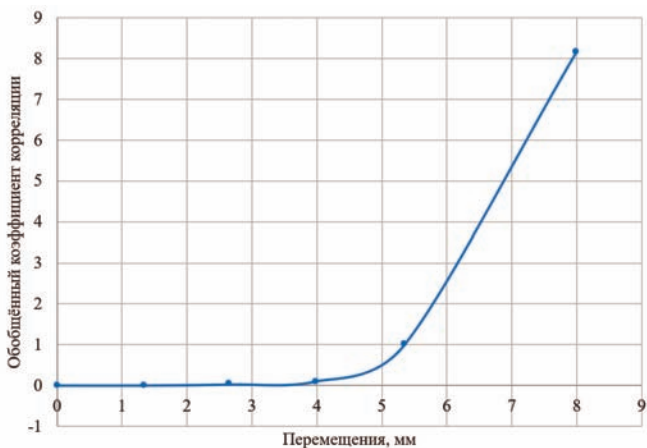


Рис. 6. Обобщённый коэффициент корреляции в виде угла в градусах между вектором нагрузки и вектором прогиба

Применение принципов корреляционного анализа к оценке нелинейностей в работе конструкций

Аналитические методы и принципы, заложенные в них, успехом могут дополнять численные методы и применяться для изучения нелинейной работы конструкций. Одним из таких методов является метод корреляционного анализа [2; 3]. При линейной работе конструкции наблюдается 100-процентная корреляция между всеми параметрами напряжённо-деформированного состояния – реактивными усилиями, нагрузками, напряжениями, перемещениями и т.д. При появлении нелинейностей в работе конструкции коэффициенты корреляции между перечисленными величинами начинают снижаться. Тем не менее в настоящее время корреляционный анализ редко применяется к изучению нелинейного деформирования конструкций в силу сравнительно низкой чувствительности коэффициентов корреляции. Так, например, если при испытании балки на изгиб проследить за изменениями прогибов на разных шагах нагружения, то нелинейность работы материала выявляется практически сразу же по характерному изменению графика прогибов. Если же рассмотреть значения коэффициента линейной корреляции Пирсона на разных шагах нагружения, то можно заметить, что рекомендуемое статистикой значение этого коэффициента 0,7, которое соответствует явному нарушению линейной корреляции, достигается при сильно выраженной нелинейности – когда конструкция близка к разрушению. Поэтому такой результат является совершенно непригодным для инженеров. Для повышения чувствительности коэффициента корреляции в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева было выполнено исследование корреляции с точки зрения векторных пространств [4]. Было установлено, что коэффициент линейной корреляции Пирсона представляет собой косинус угла между векторами отклонений от средних значений двух наборов рассматриваемых (в частности, случайных) величин. Похожий смысл имеет множественный коэффициент корреляции. Но в этом случае речь идёт об угле между вектором зависимой переменной и пространством независимых переменных. Полученные результаты позволили сделать широкие обобщения коэффициентов корреляции. Корреляцию было предложено оценивать не только по величине косинуса упомянутого угла, но и вообще любой функцией угла. Так, в частности, при оценке корреляции с помощью синуса упомянутого угла или с помощью самого угла резко повышается чувствительность корреляционного анализа. Например, для балки точность этого метода становится такой же, как и при использовании графиков прогибов или соответствующих аналитических методов. Данное положение было подтверждено численным моделированием деформирования стальной балки (рис. 3).

Рассматривалось развитие пластических деформаций в модели балки с использованием программы ANSYS (рис. 3). Балка представляла собой стальной стержень длиной 1 м прямоугольного поперечного сечения с размерами 50×50 мм. Напряжение текучести было принято 240 МПа. После

достижения текучести на диаграмме деформирования задавался небольшой подъём, так чтобы касательный модуль упругости на участке упрочнения был в 100 раз меньше модуля упругости стали. Опираение балки принималось шарнирным. Нагрузка принималась равномерно распределённой и прикладывалась шагами по 2,7% от ожидаемой разрушающей нагрузки. На каждом шаге нагружения оценивалась корреляция между данными о нагрузках, предшествовавших данному шагу, и набором соответствующих значений вертикальных перемещений на этих шагах (рис. 4). Таким образом была получена зависимость коэффициента корреляции между нагрузкой и прогибом на каждом шаге нагружения от номера шага.

При этом рассматривалось два коэффициента корреляции – коэффициент корреляции Пирсона и обобщённый коэффициент корреляции в виде угла в градусах между вектором нагрузки и вектором перемещений (рис. 5 и 6).

Использованный обобщённый коэффициент корреляции равен нулю при полной корреляции и отличается от нуля при уменьшении корреляционной связи. Так, при упругой работе материала балки данная характеристика строго равна нулю. При возникновении пластических деформаций поведение этой характеристики резко меняется, и соответствующий график заметно отклоняется от нуля (рис. 6). Из приведённых данных видно, что обобщённая оценка корреляции между нагрузкой и прогибом позволяет с высокой точностью выявить начало пластического деформирования конструкции в отличие от классического коэффициента корреляции Пирсона.

В задачах с двумя переменными (однопараметрическая нагрузка и прогиб в одной точке) разработанный подход не даёт никаких преимуществ по сравнению с известными способами анализа (например, с помощью графика «нагрузка–прогиб»). Ситуация кардинально меняется для задач с большим количеством переменных: даже для балки, нагрузка на которую будет зависеть от двух параметров, уже невозможно построить двумерный график прогибов. Это резко осложняет анализ. Ещё более сложно анализировать работу реальной конструкции или работу расчётной схемы со многими неизвестными. В этом случае разработанный метод позволяет свести многомерную задачу к двумерной.

Заключение

Приведённые примеры из практики расчётов и исследований убедительно показывают, что потенциал аналитических методов исследований строительных конструкций далеко не исчерпан. Аналитические методы нисколько не противоречат численным. Наоборот, эти методы гармонично дополняют друг друга. Для повышения эффективности исследований необходимо развивать оба направления анализа – совершенствовать численные модели материалов и элементов, а также аналитические методы.

Список источников

1. Ляпунов, А.М. Общая задача об устойчивости движения / А.М. Ляпунов. – Москва : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. – 470 с. – Текст : непосредственный.
2. Груман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Груман. – Москва : Высшая школа, 2003. – 479 с. – Текст : непосредственный.
3. Ферстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц ; Пер. с нем. – Москва : Финансы и статистика, 1983. – 302 с. – Текст : непосредственный.
4. Шилов, Г.Е. Математический анализ : Специальный курс / Г.Е. Шилов. – Москва : Физматгиз, 1961. – 436 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Lyapunov A.M. Obshchaya zadacha ob ustoichivosti dvizheniya [General Problem of Motion Stability]. Moscow, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1950, 470 p. (In Russ.)
2. Gruman V.E. Teoriya veroyatnoitei i matematicheskaya statistika [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003, 479 p. (In Russ.)
3. Ferster E., Rents B. Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza [Methods of Correlation and Regression Analysis], trans. from Germ. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1983, 302 p. (In Russ.)
4. Shilov G.E. Matematicheskii analiz. Spetsial'nyi kurs [Mathematical analysis. Special course]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1961, 436 p. (In Russ.)