

doi: 10.5862/MCE.53.1

Учет изменения жесткостей элементов в процессе монтажа и эксплуатации

*Д.т.н., главный научный сотрудник А.В. Перельмутер,
ООО НПФ «СКАД Софт»;
К.т.н., профессор О.В. Кабанцев,
Московский государственный строительный университет*

Аннотация. В статье рассматривается задача о модификации расчетной схемы сооружения, когда претерпевают изменения жесткостные параметры элементов системы.

Описываются случаи изменения жесткостей элементов несущей системы здания и случаи изменения упругих (деформационных) свойств основания, приводящие к изменениям параметров модели внешних связей. Приводятся сведения из практики проектирования о расчетных ситуациях, возникающих в процессе создания и эксплуатации зданий и сооружений, приводящих к изменению параметров жесткости отдельных элементов конструкции. Для некоторых из них представлено описание физического механизма, управляющего изменением этих параметров. Указывается на существование случаев, когда изменение жесткостей не связано с изменением имеющегося напряженно деформированного состояния и когда такое изменение реализуется.

Описываются соответствующие методы расчета и особенности конечноэлементного моделирования процессов изменения жесткостных параметров расчетной модели.

Ключевые слова: моделирование; несущие конструкции; напряженно-деформированное состояние; расчетный прогноз; расчетная технология; расчетная модель; модель внешних связей; модель воздействия

Введение и постановка задачи

Проблема учета изменений расчетной схемы при анализе работы конструкций изложена в работах [1–8]. На основе анализа возможных ситуаций, определяющих изменение расчетной модели сооружения, в работе [1] предложен и в [2] расширен набор базовых инструментов (операций), позволяющих выполнить учет изменений расчетной схемы. Набор базовых инструментов включает следующие операции:

- A.** нагружение системы известным воздействием;
- B.** установка внешней связи в узле системы, запрещающей изменение определенного перемещения или поворота;
- C.** установка внутренней связи между узлами системы, запрещающей изменение определенного взаимного перемещения или поворота этих узлов (в том числе и задание объединения перемещений);
- D.** снятие внешней связи;
- E.** снятие внутренней связи (отказ от объединения перемещений);
- F.** монтаж элемента любого типа;
- G.** демонтаж элемента (связан не только с изменением расчетной схемы, но и с необходимостью учета изменения НДС);
- H.** изменение модуля упругости элемента для текущей и всех последующих стадий монтажа;
- I.** назначение или изменение коэффициентов постели для текущей и всех последующих стадий монтажа.

Применение разработанных инструментов для расчетного анализа обусловлено необходимостью понимания специфики их действия в расчетных процедурах. Так, операции **B**, **C** определяют действие установленной внешней/внутренней связи на следующих этапах расчета, но никак не влияют на деформирование расчетной схемы на предыдущих этапах. Применение операций **D**, **E** генерирует изменение НДС расчетной модели, так как удаляемая связь является (в общем виде) напряженной. Операция **G** определяет не только изменение вида расчетной схемы, но и изменение НДС, так как в удаляемый элемент является (в общем виде) напряженным.

Действие базовых операций **H** и **I** не является однозначно определенным и требует отдельного анализа.

Элементы расчетной модели строительной конструкции наделены определенными характеристиками жесткости, которые традиционно полагаются неизменными. Но это Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. Учет изменения жесткостей элементов в процессе монтажа и эксплуатации

не соответствует реальному поведению строительной конструкции, поскольку некоторые из этих характеристик меняют свое значение вследствие внешнего вмешательства или же под влиянием изменения внешней среды.

Так, например, при реконструкции зданий возникает необходимость увеличения нагрузок на существующие конструкции, в которых в течение жизненного цикла сформировалось напряженно-деформированное состояние, соответствующее нагрузкам предшествующего эксплуатационного периода. Для обеспечения нового (более высокого) уровня несущей способности конструкций выполняются мероприятия по их усилению: наращивание сечения колонн, устройство дополнительного (внешнего) армирования ригелей и т.п. Для повышения несущей способности стен из каменной кладки применяются такие методы, как инъецирование цементными растворами по разрядно-импульсной технологии [9], устройство одно- и двухсторонних аппликаций из монолитного железобетона [10] и метод торкретирования [11].

Как правило, методы повышения несущей способности конструкций, включая приведенные выше, приводят к увеличению жесткостей элементов несущей системы. При этом в условиях сформировавшегося НДС существующего сооружения увеличение жесткостей элементов несущей системы не может изменить сложившееся распределение усилий, но должно проявиться в работе при изменении нагрузок на конструкцию либо при изменении модели внешних связей.

При реконструкции зданий, связанной с повышением нагрузок, нередко требуется обеспечить более высокую несущую способность грунтовых оснований. Более распространенными являются случаи, при которых необходимо обеспечить отсутствие или минимизацию дополнительных осадок фундаментов при увеличении нагрузок. Для реализации указанных требований применяют различные методы: цементация массива грунта под сооружением, устройство свай, работающих совместно с существующими фундаментами и т. п.

В отдельных случаях существующие сооружения (как правило, это массивные защитные комплексы гражданской обороны) могут быть использованы в качестве основания для строительства новых зданий. Например, строительство двухсекционного 17-этажного жилого дома в Москве (см. рис. 1) осуществлялось с опиранием конструкций жилого дома на конструкции защитного сооружения. Размещение жилого дома выполнено эксцентрично по отношению к плану защитного сооружения. Для обеспечения соблюдения требований норм по предельно допустимым деформациям оснований применен метод усиления фундаментов защитного сооружения с устройством буроинъекционных свай, выполняемых по разрядно-импульсной технологии. Буроинъекционные сваи выполнялись с устройством скважин через существующие конструкции фундаментов. Сваи усиления соединялись с конструкциями фундаментной плиты по специально разработанным узлам (рис. 2).



Рисунок 1. Двухсекционный 17-этажный жилой дом в Москве, возведенный на существующем сооружении гражданской обороны

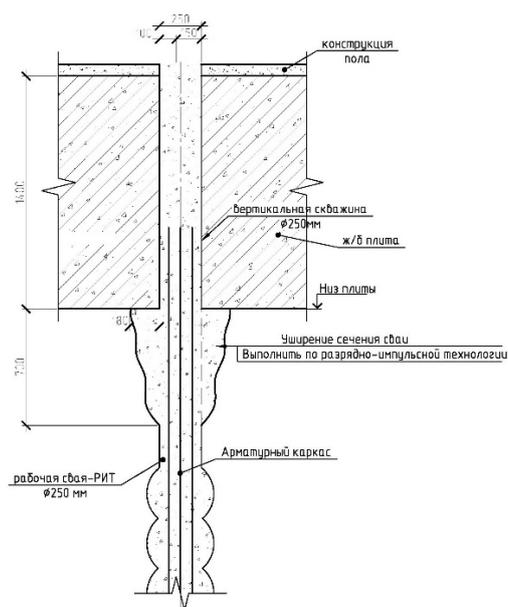


Рисунок 2. Конструктивное решение узла соединения буроинъекционной сваи усиления с фундаментной плитой существующего сооружения

Все известные способы усиления существующих фундаментов и способы повышения жесткости грунтов приводят к тому, что деформационная характеристика основания – коэффициент постели – повышается. При этом такое повышение жесткостных характеристик внешних связей может проявляться в работе существующего сооружения в условиях сформировавшегося НДС только при увеличении нагрузок. Таким образом, увеличение жесткости основания никак не может влиять на предыдущую историю деформирования конструкций.

Влияние деградации элементов

Необходимо отметить, что практика проектирования и строительства демонстрирует также примеры изменения жесткостных параметров расчетной модели несущей системы, соответствующие режиму деградации механических характеристик конструкций или физико-механических параметров основания. Такой особый режим работы конструкции под нагрузкой – деградация конструкции – формируется по различным причинам: вследствие износа конструкции в течение эксплуатационного периода (см., например, работу [12]), вследствие внешнего воздействия (коррозионное поражение элементов конструкции, разрушение от внешнего воздействия и т. п.), вследствие исчерпания несущей способности локального участка конструкции при возрастающей нагрузке. В последнем случае причиной пониженного уровня несущей способности на локальном участке может быть, например, дефект бетона или нарушение конструкции армирования.

Все приведенные примеры изменения жесткостей элементов расчетной схемы или упругих характеристик модели внешних связей с основанием порождаются различными физическими процессами или внешними воздействиями. Детально основные аспекты, приводящие к необходимости моделирования процесса изменения жесткостей, могут быть проиллюстрированы на примере деградации конструкции под возрастающей нагрузкой.

Деградация не проявляется одновременно в пределах всей конструкции. Процесс деградации заключается в формировании микроразрушений в теле конструкции, росте объема микроразрушений с переходом к макроразрушению фрагмента конструкции, после чего (при дальнейшем росте нагрузки либо повреждающего фактора) процесс выходит на уровень общего разрушения конструкции. Таким образом, деградация конструкции является многоэтапным процессом, при котором происходит изменение исходной расчетной модели. Теоретические обоснования многоэтапной механики разрушения приведены в работах [13, 14, 15].

На основе предложенных в [13, 14] принципов моделирования деградации конструкции как механизма формирования и накопления микрповреждений в материале представляется возможным исследовать, например, процесс упругопластического деформирования такой двухкомпонентной композитной среды, как каменная кладка в режиме двухосного напряженного состояния при главных напряжениях разных знаков.

Каменная кладка – это сложный композит, состоящий из разнородных материалов (кирпич/камень и раствор). Процесс деформирования каменной кладки под нагрузкой зависит от механических характеристик основных материалов композита, а также от параметров элементов, определяющих взаимосвязь кирпича и раствора – интерфейсных элементов. Сложный состав композита определяет необходимость применения метода структурного моделирования с детализацией механических свойств каждого элемента, включая интерфейсные элементы, а также систему критериев прочности, соответствующих каждому из элементов композита.

Использование совокупности (системы) критериев прочности предоставляет возможность учесть различные механизмы разрушения при исследовании упругопластического деформирования каменной кладки. Концепция оценки критического состояния материала на основе совокупности критериев прочности изложена в работах А.А. Ильюшина [15, 16] и Я.Б. Фридмана [17].

На основе результатов исследований А.А. Ильюшина в работе [14] предложен общий подход к формированию совокупности критериев прочности, суть которого состоит в следующем: пусть меры тензора поврежденности $M_n(\Omega)$, являющиеся функциями компонент Ω , могут быть использованы для формулирования критериев разрушения, соответствующих различным механизмам разрушения. Определим, что существуют константы критической поврежденности материала Ω_n^{cr} такие, что если для любого n

$$M_n(\Omega) < \Omega_n^{cr}, \quad (1)$$

то состояние частицы (элемента) прочно, а если для некоторого $n = k$

$$M_k(\Omega) \geq \Omega_k^{cr}, \quad (2)$$

то происходит разрушение типа k .

Для изотропных материалов инвариантными мерами тензора Ω являются функции k и q , которые, в свою очередь, выражают изменение деформационных свойств, определяющих поведение материалов (элементов) при гидростатическом давлении и чистом сдвиге соответственно.

Возможно, что разрушение частицы/элемента по одному из критериев, принятых в рамках системы критериев, определит невозможность сопротивления воздействию только определенного вида, тогда как для иных видов воздействий частица может работать в составе общего ансамбля частиц композита. Как показано в [14], формально это может быть выражено в скачкообразном увеличении до единицы некоторых компонент тензора поврежденности $Mn(\Omega)$. Анализ работы частиц композита (элементов расчетной модели) на основе совокупности (системы) критериев прочности позволяет различать механизмы разрушения модели, соответствующей экспериментальному образцу.

Так, например, при разрушении частицы или элемента по критерию сдвига указанная частица может оказаться в двух вариантах состояния: в случае существования в зоне частицы напряжений сжатия частица будет воспринимать такие напряжения и участвовать в работе ансамбля частиц по критерию сдвига в рамках механизма трения; в случае существования в зоне частицы напряжений растяжения такая частица выбывает из состава ансамбля частиц исследуемого тела.

На основании изложенного подхода и в соответствии с экспериментально установленными критериями прочности каменной кладки [19] представляется возможным выполнить моделирование многовариантного режима работы важнейших элементов кладки – интерфейсных элементов, которые обеспечивают связь и совместную работу основных элементов композита.

Механизм работы и разрушения интерфейсного элемента может быть представлен в следующих вариантах (см. рис. 3).

1. При действии напряжений сжатия ($-\sigma$) и непревышении прочности интерфейсного элемента по критериям прочности на сжатие и среза такой элемент работает в упругой стадии.
2. При действии напряжений сжатия ($-\sigma$) и в условиях превышения прочности интерфейсного элемента по критерию среза такой элемент продолжает участвовать в работе ансамбля элементов модели только по механизму передачи напряжений сжатия. По механизму сдвига происходит скачкообразное изменение свойств, и интерфейсный элемент обеспечивает передачу сдвиговых напряжений только в соответствии с величиной напряжений сжатия и коэффициентом трения ($F = f(-\sigma)$) между основными элементами композита.
3. При действии напряжений растяжения, не превышающих предела прочности на растяжение по неперевазанному шву, и при непревышении прочности интерфейсного элемента по критерию среза такой элемент работает в упругой стадии.
4. При действии напряжений растяжения, превышающих предел прочности на растяжение по неперевазанному шву, такой интерфейсный элемент считается разрушенным, что приводит к его выбыванию из ансамбля элементов расчетной модели.



Рисунок 3. Схема работы элементов каменной кладки при различных напряженных состояниях: слева – при наличии в разрушенном шве напряжений сжатия (механизм В); справа – при наличии в разрушенном шве напряжений растяжения (механизм D)

Работа интерфейсных элементов по вариантам 1 и 3 может моделироваться соответствующими линейно работающими конечными элементами. Работа и разрушение интерфейсных элементов по варианту 2 требует скачкообразного изменения (снижения) параметра жесткости конечного элемента только по критерию сдвига без изменения параметра жесткости по критерию сжатия – растяжения.

Моделирование механизмов разрушения интерфейсного элемента типов 2 и 4 приведет к перераспределению напряжений в ансамбле конечных элементов, моделирующих композитную среду.

Корректное моделирование процесса деградации конструкции под возрастающей нагрузкой может быть выполнено в рамках многоэтапного расчета, на любом из этапов которого может быть учтен эффект локального истощения прочности элемента модели методом введения пониженной жесткости для такого элемента, т. е. путем применения базовой операции H (изменение модуля упругости элемента). Однако снижение модуля упругости неизбежно приведет к изменению перераспределения усилий/напряжений в расчетной модели, так как корректируемый элемент находится в напряженном состоянии. Таким образом, при понижении жесткости элемента расчетной схемы на одном из этапов расчета необходимо выполнить корректировку НДС, сформировавшегося к этапу с изменением жесткости.

Деградация физико-механических параметров грунтов основания может определяться различными причинами: замачивание просадочных грунтов, обводнение грунтового массива, лежащего в основании здания и т. п. Снижение механических характеристик грунтов приводит к изменениям модели внешних связей – снижению коэффициента постели, которым моделируются упругие (упругопластические) свойства основания. Очевидно, что причины, лежащие в основе снижения деформационных свойств основания, не могут быть отнесены к обычным условиям эксплуатационного периода. Такие явления как просадка или обводнение грунтового массива относятся к особому режиму эксплуатационного периода сооружения. Следовательно, расчетное обоснование должно быть выполнено с учетом нескольких режимов работы сооружения, обеспечивая при этом поэтапное наследование НДС несущей системы.

В качестве примера можно привести проект гостиницы медиадеревни, возведенной в рамках проведения Олимпийских игр в г. Сочи в 2014 г. (см. рис. 4). Указанный случай детально описан в [19].

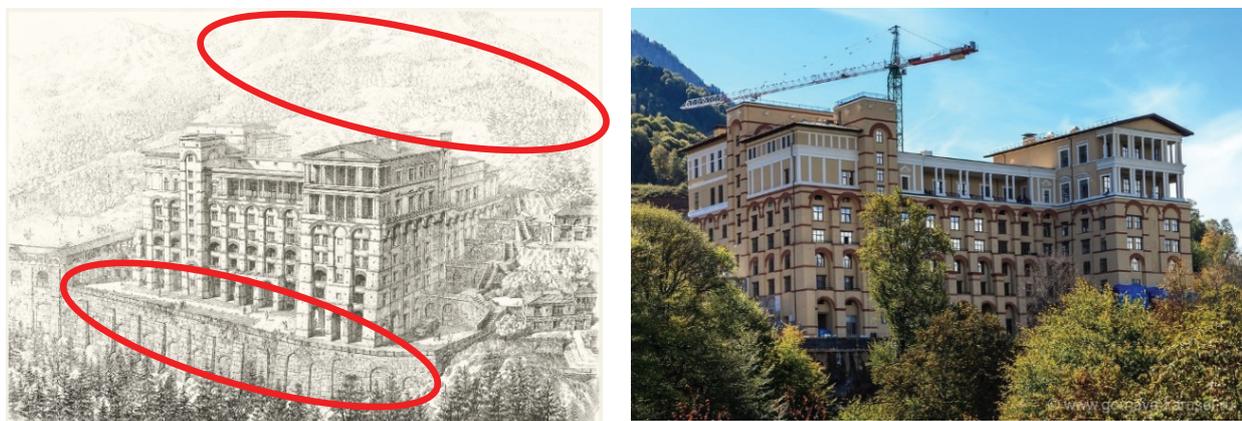


Рисунок 4. Отель олимпийской медиадеревни на площадке с абсолютной отметкой +960. Слева – проектное решение. Выделены зоны формирования оползневых процессов при обводнении грунтового массива и при сейсмических воздействиях. Справа – общий вид возведенного здания

Площадка строительства гостиницы сложена грунтами, формирующими при сложившихся инженерно-геологических условиях стабильный грунтовый массив основания. Однако гидрометеорологическим прогнозом предусматривается вариант обводнения грунтового массива при обильных ливневых осадках либо в период снеготаяния. При обводнении грунты основания существенно снижают механические характеристики, что приводит не только к снижению деформационных свойств модели грунта, но и к формированию оползневых явлений в теле грунтового массива с соответствующими нагрузочными эффектами. Указанные особенности площадки строительства объекта приводят к тому, что модель внешних связей не может быть корректно описана в рамках одного набора характеристик, принятых для всех прогнозируемых

этапов работы конструкции. Таким образом, при моделировании сложных условий работы сооружения при изменяющихся в течение жизненного цикла механических характеристиках грунтового массива необходимо применение многоэтапных расчетов с корректировкой параметров жесткости элементов модели и отслеживанием НДС несущей системы при различных моделях внешних связей.

Особенности конечноэлементного моделирования

Описанные выше изменения необходимо учитывать при анализе поведения конструкции под нагрузкой, и удобнее всего сделать это в режиме с условным наименованием «Монтаж» расчетного комплекса СКАД [20] или аналогичных режимах других расчетных комплексов¹, поскольку именно такой режим ориентирован на анализ последовательного изменения расчетной модели объекта. И если жесткостные параметры элементов системы (модуль упругости или коэффициент постели упругого основания) меняются, то это нетрудно учесть при задании схемы модификации конструкции.

Следует заметить, что в настоящей работе рассматриваются модификации расчетной схемы, связанные с реальным видоизменением параметров конструкции. Они, вообще говоря, отличаются как от тех «расчетных модификаций», которые сопровождаются поиском оптимальной конструкции [21, 22], так и от изменений, вызванных физически нелинейным характером работы материала, хотя используемый расчетный механизм решения таких задач в некоторых чертах может оказаться одинаковым.

При анализе проблемы следует различать два варианта поведения конструкции:

- элемент приобрел новую жесткостную характеристику (например, увеличилась жесткость обжатого упругого основания), но при этом напряженно-деформированное состояние системы не изменилось, а новая характеристика жесткости может проявиться лишь при изменении нагрузки;
- элемент поменял свою жесткостную характеристику, оставаясь нагруженным (например, упал модуль упругости сильно разогретого стального элемента), т. е. то внутреннее усилие, которое в нем было до модификации передается обновленному элементу и происходит перераспределение усилий в системе без изменения нагрузки.

Различие двух указанных расчетных ситуаций нетрудно понять, используя рассуждение в стиле известного «метода параллельного элемента» [21, 23], когда увеличение или уменьшение жесткости моделируется добавлением в расчетную схему или изъятием из нее элемента, параллельного модифицируемому.

Поскольку при добавлении элемента в систему полагается, что к ней присоединяется ненапряженный элемент, то при неизменной нагрузке напряженно-деформируемое состояние системы не меняется. Во втором случае из системы удаляется напряженный элемент, что приводит к перераспределению усилий, поскольку реакция удаляемого элемента должна быть воспринята остающимися элементами системы.

Второй случай можно проиллюстрировать следующим примером. Пусть жесткость элемента изменилась и, например, вместо EA стала равной $EA_{new1} < EA$. Выполним модификацию системы в два этапа: на первом в параллель с существующим элементом введем новый с жесткостью EA_{new1} , а на втором этапе удалим старый элемент с жесткостью EA (рис. 5).

Первая операция является подготовительной, добавление элемента не изменит картину напряжений в системе. А удаление элемента заставит передать ранее действовавшие в нем внутренние усилия на новую систему с изменившейся жесткостью. Заимствованный из книги [23] и приведенный ниже простой пример (см. рис. 6) иллюстрирует сказанное.

¹ Нужно помнить, что такой режим может иметь другое название. Например, в системе ANSYS он именуется «схема размножения и гибели элементов»

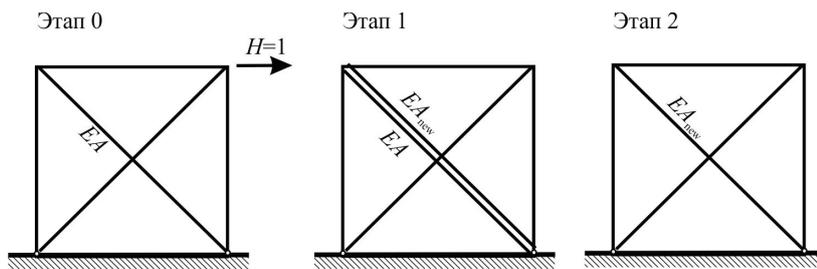


Рисунок 5. Моделирование уменьшения жесткости

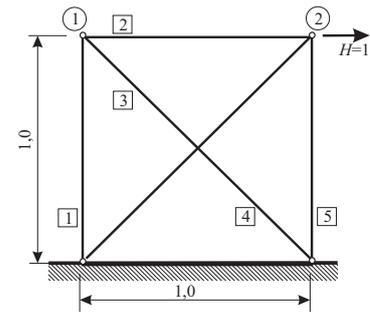


Рисунок 6. Схема к примеру из [23]

Пусть первоначальная жесткость всех элементов $EA = 1,0$. Тогда матрица жесткости системы равна

$$K = \begin{bmatrix} 1 + \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & -1 & 0 \\ \sqrt{2}/2 & 1 + \sqrt{2}/2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 + \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 0 & 0 & \sqrt{2}/2 & 1 + \sqrt{2}/2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

а вызванные силой H перемещения и усилия представлены во втором столбце таблицы 1.

Если жесткость третьего элемента уменьшилась до величины $EA_3 = 1/\sqrt{2}$, то, следуя сказанному, введем в систему параллельный третьему новый элемент с жесткостью EA_{new} . Матрица жесткости системы станет равной

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 + \sqrt{2}/2 + 1/2 & \sqrt{2}/2 + 1/2 & -1 & 0 \\ \sqrt{2}/2 + 1/2 & 1 + \sqrt{2}/2 + 1/2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 + \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 0 & 0 & \sqrt{2}/2 & 1 + \sqrt{2}/2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

но поскольку присоединен ненапряженный элемент, перемещения и усилия не меняются (нулевые приращения, показанные в столбце 4 таблицы 1).

Теперь удалим из системы старый элемент 3, матрица жесткости изменится и станет равной

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 + 1/2 & 1 + 1/2 & -1 & 0 \\ 1 + 1/2 & 1 + 1/2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 + \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 0 & 0 & \sqrt{2}/2 & 1 + \sqrt{2}/2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

а под действием нагрузки, которая должна погасить реакцию удаленного элемента, система получит приращения перемещений и усилий, показанные в столбце 6 таблицы. Окончательное напряженно-деформированное состояние зафиксировано в седьмом столбце таблицы.

В программных комплексах, где реализована технология учета изменения расчетной модели, в ситуациях, требующих учета изменения НДС системы при изменении жесткостей отдельных элементов, возникает необходимость прямого моделирования такого процесса с использованием представленной выше схемы параллельного элемента.

Таблица. Результаты расчета примера из [23]

Состояние	Этап 0		Этап 1		Этап 2			
	Накoppлено	Приращение	Накoppлено	Приращение	Накoppлено	Приращение	Суммарно	
	1	2	3	4	5	6	7	
Перемещения	u_1	0,0	1,690	1,690	0,0	1,690	0,260	1,950
	v_1	0,0	0,441	0,441	0,0	0,441	-0,052	0,389
	u_2	0,0	2,135	2,135	0,0	2,135	0,204	2,341
	v_2	0,0	-0,556	-0,556	0,0	-0,556	-0,054	-0,610
Усилия	S_1	0,0	0,441	0,441	0,0	0,441	-0,053	0,388
	S_2	0,0	0,445	0,445	0,0	0,445	-0,053	0,392
	S_3	0,0	-0,625	-0,625	0,0	-0,625	1,176	0,551
	S_4	0,0	0,790	0,790	0,0	0,790	0,074	0,864
	S_5	0,0	-0,556	-0,556	0,0	-0,556	-0,052	-0,608

Выводы

1. Многие задачи расчетного анализа строительных конструкций связаны с необходимостью учета возможного изменения параметров жесткости элементов расчетной схемы.

2. Если изменения параметров жесткости учитываются не путем замены элемента, а изменением параметра жесткости (модуля упругости, коэффициента постели), то следует различать случаи пересчета или отсутствия пересчета напряженно-деформированного состояния конструкции и использовать методы, обеспечивающие корректное моделирование расчетной ситуации.

Статья подготовлена в рамках Гранта государственной поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами Российской Федерации, № НШ-6545.2014.8.

Литература

1. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: СКАД СОФТ и др., 2011. 709 с.
2. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. №5. С. 15–26.
3. Kim H.S., Shin A.K. Column Shortening Analysis with Lumped Construction Sequences // Procedia Engineering. 2011. Vol. 14. Pp. 1791–1798.
4. Jayasinghe M.T.R., Jayasena W.M.V.P.K. Effects of Axial Shortening of Columns on Design and Construction of Tall Reinforced Concrete Buildings // Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE. 2004. Vol. 9. No. 2. Pp. 70–78.
5. Барабаш М.С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. Vol. 8. Issue 3. Pp. 58–67.
6. Кабанцев О.В. Расчет несущих конструкций зданий с учетом истории возведения и поэтапного изменения основных параметров расчетной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №7. С. 33–35.
7. Кабанцев О.В. Расчет конструкций многоэтажных и высотных железобетонных зданий с учетом изменения основных параметров расчетной модели в режимах возведения и эксплуатации // Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференция по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.), том 1 «Теория железобетона. Железобетонные конструкции. Расчет и конструирование. С. 282–292.
8. Кабанцев О.В., Карлин А.В. Расчет несущих конструкций с учетом истории возведения и поэтапного изменения основных параметров расчетной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №7. С. 33–35.

9. Кабанцев О.В., Тонких Г.П., Еремин В.Я., Тихонов М.В. Экспериментальные исследования несущей способности каменной кладки с трещинами при их инъектировании цементным раствором по разрядно-импульсной технологии // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. №2. С. 127–135.
10. Кабанцев О.В. Методы расчета сейсмоусиления конструкций из каменной кладки односторонними монолитными железобетонными аппликациями // Вестник МГСУ. 2011. №2 (т. 1). С. 51–57.
11. Кабанцев О.В., Тонких Г.П., Симаков О.А., Симаков А.Б., Баев С.М. Повышение сейсмостойкости каменных конструкций односторонними аппликациями из торкрет-бетона // Аэропорты. Прогрессивные технологии. 2011. №2. С. 26–32.
12. Перельмутер А.В. Износ и надежность стальных конструкций // Автоматическая сварка. 2000. №9–10 (570–571). С. 107–112.
13. Бурого Н.Г. Моделирование разрушения упругопластических тел // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. Т.1. №4. С. 5–20.
14. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / Под ред. Ю.В. Соколкина. М.: Наука. Физматлит. 1997. 228 с.
15. Ильюшин А.А. Об одной теории длительной прочности // Инженерный журнал. Механика твердого тела. 1967. №3. С. 21–35.
16. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М: Изд-во МГУ, 1978. 287 с.
17. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение. 1974. 472 с.
18. Кабанцев О.В., Частные критерии прочности каменной кладки для анализа упруго-пластического деформирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. №3. С. 36–41.
19. Kabantsev O., Perelmuter A. Modeling Transition in Design Model when Analyzing Specific Behaviors of Structures // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 479–488.
20. Кабанцев О.В., Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Перельмутер А.В. Технология расчетного прогноза напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом истории возведения, нагружения и деформирования // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. Vol. 7. Issue 3. Pp. 110–117.
21. Grzedzielski A.L.M. Nota of Some Application of the Matrix Force Method of Structural Analysis // Journal Royal Aeronautics Society. 1960. Vol. 64. No. 594.
22. Сергеев Н.Д. Расчет статически неопределимых систем при их многократной последовательной модификации // Строительная механика и расчет сооружений. 1975. №6. С. 11–16.
23. Мажид К.И. Оптимальное проектирование конструкций. М.: Высшая школа, 1979 –237 с.

*Анатолий Викторович Перельмутер, г. Киев, Украина
Тел. раб.: +3(8050)382-16-25; эл. почта: avp@scadsoft.com*

*Олег Васильевич Кабанцев, Москва, Россия
Тел. +7(916)695-77-30; эл. почта: ovk531@gmail.com*

© Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., 2015

doi: 10.5862/MCE.53.1

Accounting for the elements stiffness change in the course of erection and operation

A.V. PerelmuterLLC Research and Production Company "SCAD Soft", Kiev, Ukraine
+380503821625; e-mail: avp@scadsoft.com**O.V. Kabantsev**Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia
+79166957730; e-mail: ovk531@gmail.com

Key words

modeling, load-carrying structures; stress-and-strain state; design prediction; calculation technique; design model; model of external constraints; action model

Abstract

The problem statement related to modification of structural design model, when stiffness parameters of the structural members undergo changes, was considered.

Some data was outlined from the design practice concerning design cases that occur during erection and maintenance of buildings and structures, when stiffness parameters of some structural members undergo changes. A physical mechanism that controls changing of these parameters was described for some of the design cases. Likewise, attention was paid to the design cases when changing of stiffness parameters has no relation to changing of actual stress-and-strain state and when such change occurs.

Appropriate analysis methods were described.

References

1. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ih analiza* [Calculation models of structures and the possibility of their analysis] Moscow: SKADSOFT, 2011. 709 p. (rus)
2. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Uchet izmeneniy raschetnoy skhemy pri analize raboty konstruksii [Structural behavior analysis taken into account changes of design model]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No.5. Pp. 15–26. (rus)
3. Kim H.S., Shin A.K. Column Shortening Analysis with Lumped Construction Sequences. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14. Pp. 1791–1798.
4. Jayasinghe M.T.R., Jayasena W.M.V.P.K. Effects of Axial Shortening of Columns on Design and Construction of Tall Reinforced Concrete Buildings. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. ASCE. 2004. Vol. 9. No. 2. Pp. 70–78.
5. Barabash M.S. Metody kompyuternogo modelirovaniya protsessov vozvedeniya vysotnykh zdaniy [The methods of computer simulation erection processes of high-rise buildings]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. Vol. 8. Issue 3. Pp. 58–67. (rus)
6. Kabantsev O.V. Metod rascheta mnogoetazhnykh zdaniy s uchetom protsessa izmeneniya raschetnoy shemy pri razlichnykh rezhimakh raboty [Method of calculating the multi-storey buildings taking into account changing process calculated scheme under different operating conditions]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2013. No. 10. Pp. 43–51. (rus)
7. Kabantsev O.V. Raschet konstruksiy mnogoetazhnykh i vyisotnykh zhelezobetonnykh zdaniy s uchetom izmeneniya osnovnykh parametrov raschetnoy modeli v rezhimakh vozvedeniya i ekspluatatsii [Structural analysis of high-rise reinforced-concrete buildings taking into account changes of basic parameters of the design model in erection and operation modes]. *Nauchnyye trudy III Vserossiyskoy (II Mezhdunarodnoy) konferentsiya po betonu i zhelezobetonu (Moskva, 12-16 maya 2014 g.), tom 1 «Teoriya zhelezobetona. Zhelezobetonnyye konstruksii. Raschet i konstruirovaniye»* [Scientific works III All (II International) Conference on concrete and reinforced concrete (Moscow, May 12-16, 2014), volume 1 "The theory of reinforced concrete. Reinforced concrete structures. Calculation and design]. Pp. 282–292. (rus)
8. Kabantsev O.V., Karlin A.V. Raschet nesuschih konstruksiy s uchetom istorii vozvedeniya i poetapnogo izmeneniya osnovnykh parametrov raschetnoy modeli [The calculation load-bearing structures, taking into account the history of erection and construction of phase changes in the basic parameters of the calculation model]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2012. No. 7. Pp. 33–35. (rus)

Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. Accounting for the elements stiffness change in the course of erection and operation

9. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P., Eremin V.Ya., Tikhonov M.V. Eksperimentalnyye issledovaniya nesushchey sposobnosti kamennoy kladki s treshchinami pri ikh injecting grout to-discharge pulse technology [Experimental research of bearing capacity of masonry cracked when injected with cement mortar on the discharge-pulse technology]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2011. No. 2 (v. 1). Pp. 127–135. (rus)
10. Kabantsev O.V. Metody rascheta seismosileniya konstruksiy iz kamennoy kladki odnostoronnimi monolitnymi zhelezobetonnyimi aplikatsiyami. [Methods for calculating the seismic reinforcement of masonry structures sided monolithic concrete applications]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2011. No. 2 (v. 1). Pp. 51–57. (rus)
11. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P., Simakov O.A., Simakov A.B., Baev S.M. Povysheniye seysmostoykosti kamennykh konstruksiy odnostoronnimi aplikatsiyami iz torkret-betona [Increasing seismic resistance of masonry structures unilateral applications of shotcrete]. *Magazine Aeroporty. Progressivnye tekhnologii*. 2011. No. 2. Pp. 26–32. (rus)
12. Perelmuter A.V. Iznos i nadezhnost stalnykh konstruksiy [Wear and reliability of steel structures]. *Automatic welding*. 2000. No 9–10(570–571). Pp. 107–112. (rus)
13. Burago N.G. Modelirovanie razrusheniya uprugoplasticheskikh tel [Modelling of damage in elastic plastic bodies]. *Computational Continuum Mechanics*. 2008. Vol.1. No 4. Pp. 5–20.
14. Vildeman V.E., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. *Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of inelastic deformation and destruction composite materials]. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1997. 228 p. (rus).
15. Iliushin A.A. Ob odnoi teorii dlitelnoi prochnosti [About one theory of long-term strength]. *Inzhenernyi zhurnal. Mekhanika tverdogo tela*. 1967. No. 3. Pp. 21–35. (rus)
16. Iliushin A.A. *Mekhanika sploshnoi sredy* [Mechanics of Continua]. Moscow: Izd-vo MGU, 1978. 287 p. (rus)
17. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskiye svoystva metallov. Ch. 1. Deformatsiya i razrusheniye* [Mechanical properties of metals. Part. 1. Deformation and destruction]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1974. 472 p. (rus)
18. Kabantsev O.V. Chastnyye kriterii prochnosti kamennoy kladki dlya analiza uprugoplasticheskogo deformirovaniya [Partial criteria of masonry strength for elastic-plastic deformation]. *Earthquake engineering. Safety of structures*. 2013. No. 3. Pp. 36–41. (rus)
19. Kabantsev O., Perelmuter A. Modeling transition in design model when analyzing specific behaviors of structures. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 479–488.
20. Kabantsev O.V., Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Perelmuter A.V. Tekhnologiya raschetnogo prognoza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruksiy s uchetom istorii vozvedeniya, nagruzheniya i deformirovaniya [Technology calculation prediction stress-and-strain state of structures taking into account the history of construction, load and deformation]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011. Vol. 7. Issue 3. Pp. 110–117. (rus)
21. Grzedzielski A.L.M. Nota of Some Application of the Matrix Force Method of Structural Analysis. *Journal Royal Aeronautics Society*. 1960. Vol. 64. No. 594.
22. Sergeyev N.D. Raschet staticheskii neopredelimykh sistem pri ikh mnogokratnoy posledovatelnoy modifikatsii [Calculation of statically indeterminate systems with their multiple sequential modification]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 1975. No.6. Pp. 11–16. (rus)
23. Mazhid K.I. *Optimalnoye proyektirovaniye konstruksiy* [Optimal design of structures]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 237 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 6–14